Liebe Leserinnen, liebe Leser!

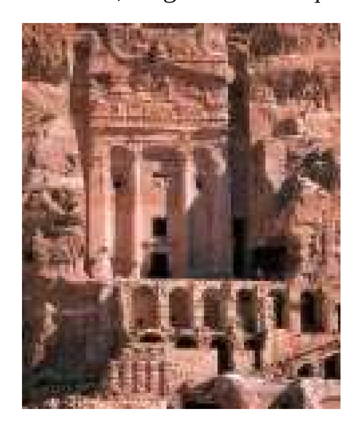

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Wenn wir im Titelthema vom „neuen Kosmos“ sprechen, beleuchtet das die rasante Entwicklung auf diesem Feld. Beobachtungen haben in den letzten Jahren den Verdacht erhärtet, dass sich das Universum in seiner Expansion beschleunigt. Nun versuchen die Forscher zu klären, welche „Urkraft“ hinter dieser All-Gewalt steckt, die das Universum durch ihre abstoßende Wirkung – entgegen der „gewöhnlichen“, anziehenden Gravitation – in eine düstere Unendlichkeit zerstieben lässt.

Dazu schildern führende Kosmologen und Teilchenphysiker in einer zweiteiligen Folge, wie sie dieses vielleicht tiefgründigste Rätsel der Welt lösen wollen – mit neuen Fundamentaltheorien und verbesserten Beobachtungen durch geplante Satelliten (Seite 30).

Irdischeren Fragen wenden sich unsere Altersforscher zu. Es scheint wie der unvermeidliche Fluch des Älterwerdens, dass 15 Prozent der 65-Jährigen und ein Drittel aller 85-Jährigen von Altersschwachsinn befallen werden, meist als Opfer der Alzheimer-Krankheit. Weil gewisse Gehirnregionen absterben, verlieren solche Patienten allmählich ihr Gedächtnis, ihre Persönlichkeit sowie die Kontrolle über ihre Körperfunktionen.

In den Gehirnen von Alzheimer-Patienten lagern sich Proteinklumpen ab, so genannte Plaques. Von einem generellen Heilmittel sind die Forscher noch meilenweit entfernt. Dennoch keimt Hoffnung: Seit kurzem testen amerikanische Mediziner einen Impfstoff, der – zumindest bei Mäusen – nicht nur die Zusammenballung neuer Klumpen im Gehirn hemmt, sondern sogar bereits bestehende abbaut. Die entsprechenden Tiere jedenfalls scheinen ihre „Geisteskraft“ teilweise wiederzuerlangen. Klinische Studien müssen nun klären, ob diese Therapie auch beim Menschen funktionieren könnte (Seite 44).


Felsgräber in Petra

Alljährlich pilgern Touristen zu den Felsgräbern von Petra im südlichen Jordanien. Wie der Archäologe Robert Wenning von der Katholischen Universität Eichstätt beschreibt, sind die Ursprünge des in der Bibel erwähnten Volkes der Nabatäer, die in Petra ihren Hauptsitz hatten, immer noch rätselhaft. Kein Wunder: Jahrhundertelang waren die Ruinen Europäern versperrt. Eigenes Schriftgut haben die Fürsten des Weihrauchhandels kaum hinterlassen. Griechische und römische Historiker beschrieben die Nabatäer allzu sehr aus ihrer Sicht. Nun liefert Wenning durch Auswertung alter Schriften und archäologischer Befunde neue Einsichten (Seite 76).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

Seit kurzem ist unser neues Wissenschaftsportal eröffnet! Sie finden es im Web unter **www.wissenschaft-online.de** oder (mit gewohnten Inhalten) unter **www.spektrum.de**. Beim Klick auf dieses Portal werden Sie „rundum“ mit Wissenschaft bedient: mit Nachrichten aus Forschung und Technik, Veranstaltungstipps, Produktofferten etwa zu Sach- und Fachbüchern und vielem mehr. Außerdem bietet Ihnen wissenschaft-online Zugriff auf zahlreiche Archive und Wissenschaftslexika.

TITELBILD:

Wie diese Computersimulation sichtbar macht, wurde das Universum kurz nach dem Urknall durchgeschüttelt. Echos dieses Vorgangs wollen die Astronomen entdecken.

Grafik: Slim Films

MONATSSPEKTRUM

SPEKTROGRAMM

HAUPTARTIKEL



SERIE (TEIL I):

Der neue explosive Kosmos

Seiten 30 – 43

Spannende Zeiten für die Kosmologie: Was verbirgt sich hinter der Kraft, die das Universum auseinanderschleudert? Die Kosmologen *Jeremiah P. Ostriker* und *Paul J. Steinhardt* nennen es „die Quintessenz“. Der Princetonphysiker *P. James E. Peebles* verteilt Zensuren an das heutige Standardmodell. Und der britische Theoretiker *João Magueijo* zeigt ketzerisch, wie sich der Kosmos auch ohne „Inflation“ betreiben ließe.

MEDIZIN

Hilfe bei Alzheimer?

Seite 44

Von Peter H. St George-Hyslop

Noch können Ärzte die Alzheimer-Krankheit nicht heilen. Doch von dem Zerstörungsprozess im Gehirn setzen Molekularbiologen und Genetiker immer mehr Puzzleteile zu einem Gesamtbild zusammen. Zumindest an Mäusen gelang es jetzt, alzheimerähnlichen Erscheinungen durch eine Impfung entgegenzuwirken.



SAURIER

Räuber im Jurameer

Von Ryosuke Motani Seite 52

Ichthyosaurier, Zeitgenossen der Dinosaurier, bejagten die Meere länger als 150 Millionen Jahre. Wie die „Fischechsen“ zu Tiefseetauchern wurden, kann die Wissenschaft jetzt erklären. Doch warum die völlig ans Meer angepassten riesigen Reptilien schon lange vor den Dinosauriern ausstarben, bleibt weiterhin rätselhaft.

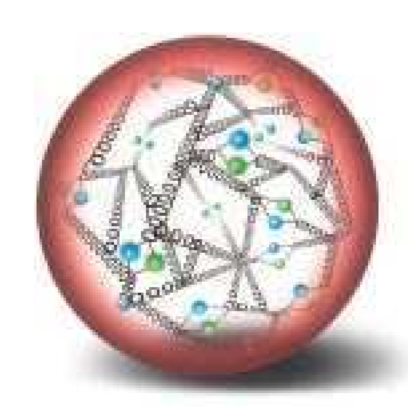
TEILCHENPHYSIK

Das Innenleben des Protons

Seite 62

Von Robert Klanner

Nach acht Jahren Laufzeit des Speicherrings Hera in Hamburg – einer Art „Super-Elektronenmikroskop“ – hat sich das Gesamtbild von der Struktur des Protons und der Naturkräfte erheblich erweitert.





SPORTMEDIZIN

Muskeln, Gene und Leistungssport

Seite 70

Von Jesper L. Andersen, Peter Schjerling und Bengt Saltin

Das beste Training verhilft kaum zum Sprung in die Weltelite, wenn die individuellen natürlichen Voraussetzungen nicht stimmen. Werden einmal gentechnisch aufgerüstete Superathleten die Wettkämpfe bestreiten?

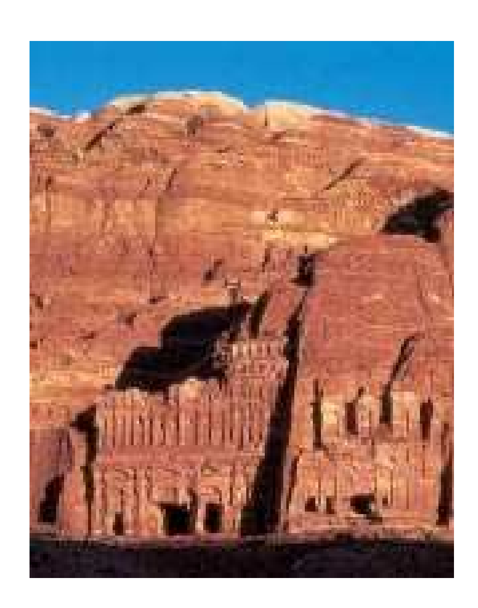
ARCHÄOLOGIE

Petra – Metropole am Rande der Wüste

Seite 76

Von Robert Wenning

Wer waren die Nabatäer, die jahrhundertelang von Petra aus den Weihrauchhandel kontrollierten? Schriften und neu interpretierte archäologische Befunde zeichnen ein schillerndes Bild dieses arabischen Stammes.



Spektrum-Report:

Digitale Filmtechnik

Seite 84

Die Filmindustrie ist im Umbruch. Ob Spielfilm oder Werbespot – ohne Digitaltechnik geht heute nichts mehr. Sie fördert die Kreativität und bietet Einsparpotenziale. Ihrem Einfluss ist es zu verdanken, dass die Nachbearbeitung mehr und mehr Teil des schöpferischen Prozesses wird. Der neueste Trend: Digitaltechnik schon beim Dreh.

Themen:
Wirklicher als die Wirklichkeit • Großer Film für kleines Geld • Computergenerierte Figuren • Kino für Computerfreaks



FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

BUCH-REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

WEITERE RUBRIKEN

Manche mögen’s warm

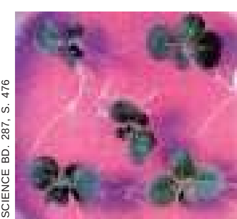
Monatsspektrum – Januar 2001

Gentechnische Anpassung an globale Erwärmung?

Der Artikel gibt interessante Einblicke in die gentechnischen Potenziale der Anpassung von Nutzpflanzen an „Wärmestress“. Dabei wird der Eindruck vermittelt, dass hiermit pflanzenbauliche Adaptionen an den globalen Temperaturanstieg möglich wären. Dieser Schluss erscheint zu pauschal und sollte auf der agrarisch relevanten regionalen Skala differenziert werden, da modellierte Erwärmungen insbesondere in den höheren Breiten zu erwarten sind und dort sogar als günstig erachtet werden können. Darüber hinaus könnte eine globale Erwärmung die Dynamik des Golfstroms beeinflussen und die Flora Westeuropas einem massiven Kältestress aussetzen. Daneben sind andere klimabedingte und für die Pflanzenproduktion erhebliche Faktoren nicht zu vernachlässigen; man denke an den zunehmenden Trockenstress in mediterranen Regionen. Somit kann von gentechnischer Adaption an den globalen Klimawandel erst gesprochen werden, wenn damit die Verbesserung der Trockenheits-, Wärme- und Kältetoleranz von Pflanzen möglich erscheint.

Dr. Stephan Lingner, Bad Neuenahr-Ahrweiler





SCIENCE BD. 287, S. 476

Die transgene Tabakpflanze (grün) bleibt bei Hitze gesund.

Fermi, Szilard und der erste Atomreaktor

Januar 2001

Kohlenstoff-Formen

Die amorphe Form des Kohlenstoffs ist der Ruß. Der Graphit dagegen gehört wie der Diamant zu den kristallinen Formen des Kohlenstoffs.

Dr. H. Beneke, Castrop-Rauxel

Hahn allein

F. Strassmann hat zwar die wesentlichen chemischen Experimente zur Entdeckung der Kernspaltung durchgeführt, den Nobelpreis hat O. Hahn als Chef aber allein kassiert. Auch L. Meitner, die die Ergebnisse theoretisch interpretierte, ging leer aus.

Dr. W. Brüchle, Weiterstadt

Nicht nur Meitner

Im Artikel wird nur Lise Meitner als Deuterin der Versuche von Hahn und Strassmann erwähnt. Meines Wissens fand L. Meitner diese Erklärung (als Kernspaltung) in gemeinsamer Arbeit mit ihrem Neffen O. R. Frisch.

Dr. Uwe Jens Amlong, Berlin

Insulin – Hüter des Zuckerhaushalts

Monatsspektrum – Januar 2001

Insulin wird gespritzt, aber nicht intravenös, sondern subkutan. Aus dem Fettgewebe wird das Insulin langsam in die Blutbahn abgegeben, und damit wirkt es gleichmäßiger (wohlgemerkt: ich spreche von sog. Normalinsulinen). Bei Injektionen direkt in die Blutbahn setzt die Wirkung des Insulins zu schnell ein und hält nur kurze Zeit an.

Georg Notni, Jena

Stärken schwächen, Schwächen abbauen

Forschung und Gesellschaft – November 2000

Wertvolle Ware

Ich stimme Prof. Mlynek zu, dass die Studierenden sich mit ihrer Universität identifizieren können sollten, dass Universität und Studierende eine Einheit bilden sollten. Doch das ist mit ihrer Trennung in Dienstleisterin und Kunden unvereinbar. Die Universität muss vielmehr als eine Interessengemeinschaft von Studierenden und Forschenden betrachtet werden. Als Kunden der Interessengemeinschaft „Universität“ sind die Unternehmen anzusehen. Diese profitieren von den Universitäten nicht nur durch verwertbare wissenschaftliche Ergebnisse, sondern vor allem durch hervorragend ausgebildete Mitarbeiter. Wie wertvoll diese „Ware“ ist, entnimmt man der jetzigen Greencard-Diskussion. Dafür können die Universitäten eine Gegenleistung erwarten, die sie aber bisher nicht erhalten. Es sind also die Unternehmen in der Pflicht. Wenn sie Qualität erwarten, muss erst einmal das Geld stimmen.

Simon King, Kehl

Kosten-Forschrittstrend

Prof. Mlynek fordert, dass Sachverständige die Qualität der Lehre und Forschung einer Universität ständig überprüfen. Die Forschungsqualität lässt sich aber unmittelbar kaum bewerten, denn zu mannigfaltig ist eine Universität strukturiert. Die Forschungsqualität als Ganzes einer Universität lässt sich anscheinend nur als eine Funktion der Forschungsqualitäten ihrer einzelnen Institute bewerten, wenn man von Folgendem ausgeht: Große wissenschaftliche Vorhaben der Institute werden seit langem fast nur von Dritten – von staatlichen Stellen, DFG, EG usw. oder von privatwirtschaftlichen Unternehmen – finanziert. Diese Vorhaben betreffen nicht nur Grundlagenforschungen, sondern auch angewandte Forschungen und – „technologische“ Entwicklungen. Jedes dieser Vorhaben lässt sich aber grundsätzlich einer Kosten-Fortschrittstrend-Analyse unterziehen. So ist beispielsweise ein naturwissenschaftliches Forschungsergebnis dann eine beachtliche Hochleistung, wenn mit ihm ein Ordnungsprinzip der Natur auf originelle Art und Weise (= absolut neuartig) ausgelotet wird. Dieser „Fortschritt“ lässt sich prinzipiell als eine nominier- und normierbare Prüfgrößenart mittels allgemein gültiger, voneinander unabhängiger, nicht widersprüchlicher Eigenschaftsmerkmale bilden. Das trifft auch auf die rein geistes- oder die gesellschaftswissenschaftlichen Forschungen zu, denn auch sie müssen ihr Fach voranbringen. Der Fortschrittstrend eines konzepttechnischen Ergebnisses lässt sich sogar über den naturgesetzlich begründbaren Begriff des „technischen Fortschrittes“ durch die erzielte technische Gesamtwirkung messen.

Dr. Alfred Kumm, Bonn



TH. RAUPACH / ARGUS

Es gibt kaum volle Hörsäle in den Ingenieurwissenschaften.

Die Macht der Meme

Dezember 2000

Mikrokomplex Mem

Zu dem von Dawkins 1976 geprägten Begriff „Mem“ ist anzumerken, dass der Physiker Heinz Förster bereits in seiner Monografie „Das Gedächtnis“ diesen Begriff eingeführt hat, allerdings in etwas anderem Zusammenhang:

„In Analogie zu der von Delbrück, Schrödinger u. a. entwickelten Auffassung, das „Gen“, den Träger der Erbmerkmale, als Quantenzustand eines Großmoleküls zu deuten, wird hier das „Mem“, der Träger der Erinnerungsmerkmale, als ein verschiedener Quantenzustände fähiger Mikrokomplex aufgefasst.“

Dr. F. Bestenreiner, Grünwald

Ursachen für Attraktivität

Herr Voland behauptet, dass die Mem-Theorie nichts erklärt, solange nicht die Ursachen für die unterschiedliche Attraktivität der Meme gefunden worden sind. Die Evolutionstheorie war in der gleichen Lage, solange noch nicht bekannt war, wie Erbanlagen vererbt werden. Die molekularen und zellulären Details der Umsetzung von Genotypen in Phänotypen sind bis heute unbekannt.

Andreas Meissner, Berlin

Kinder lernen von Kindern

Prof. Voland behauptet in seinem Interview, Kinder würden vorzugsweise von ihren Eltern lernen. Das ist mit Einschränkung nicht der Fall. Kinder lernen am schnellsten von anderen Kindern.

Eckhard Rüggeberg, Lehrte

Dem Griff der Gene entkommen

Die Mem-Diskussion reiht sich ein in die unendliche Geschichte, die um die vermeintliche Sonderstellung des Menschen in der Evolution gesponnen wird. Von allen Lebensformen auf dem Planeten soll es nur Homo gelungen sein, dem Griff der Gene zu entkommen?

Dr. A. Schüle, Dortmund

In der Kombination liegt das Potenzial

Volands Argumente widerlegen Blackmore in keiner Weise. Der von Blackmore und bereits Dawkins benutzte Begriff „Eigenständige Replikatoren“ bedeutet nicht, dass Meme aktiv etwas zu ihrer Verbreitung tun. Ebenso wie Gene sind sie passiv in dem Sinn, dass sie „nur“ kopiert und selektiert werden. Ebenfalls wie bei Genen liegt in der Kombination von Veränderlichkeit und Fortpflanzung die unglaubliche Kraft zur Erzeugung einer vielfältigen Biosphäre bzw. Ideenwelt.

Was man Blackmore allenfalls vorwerfen kann, ist die Art, wie sie die Mem-Theorie unnötigerweise mit einer gewagten, publikumswirksamen Hypothese verknüpft hat: dass sie die Quelle der menschlichen Einzigartigkeit seien.

Michael Groß, Oxford



Kooperation in großen Verbänden

Bei Blackmores Vorstellungen handelt es sich lediglich um eine neue Formulierung der alten These vom „biokulturellen Feedback“ einer positiven Rückkopplung zwischen kultureller und organischer Evolution. Diese These lässt erwarten, dass Gehirnevolution und kulturelle Entfaltung synchronisiert verlaufen sind und widerspricht dem archäologischen Befund.

Dennoch bin ich überzeugt, dass der Memetik eine entscheidende Bedeutung für das Verständnis des menschlichen Verhaltens zukommt. Im Gegensatz zur Genetik kann sie evolutionstheoretisch erklären, warum Menschen in beliebig großen Verbänden kooperieren können.

Eduard Kirschmann, Hannover

Mittels des Glaubens Katastrophen überwinden

Ich denke, dass die Sicht der Religiosität als „zum Überleben nutzlos“ zu kurz greift. Ein Beispiel aus neuerer Zeit betrifft die Erdbebenopfer in der Türkei. Gemäß einer Zeitungsnotiz wussten die Helfer, dass die Betroffenen wegen ihres Glaubens diese Katastrophe ohne Psychotherapie überwinden werden.

Jörg Michael, Hannover

Anmerkung von Professor Eckart Voland

Zugegeben – es ist schon verführerisch, die menschliche Kulturgeschichte als Ausfluss reproduktiver Konkurrenz eigenständiger Replikatoren zu denken. Ich sehe aber die Gefahr, dem Charme bequemer Unschärfen zu erliegen und Analogien zu genetischen Prozessen sehen zu wollen, wo es keine gibt. Gene können biochemisch dargestellt werden – aber Meme? Sie werden funktional definiert, ohne dass ihnen eine materielle Individualität zugeordnet werden könnte. Freilich – zu Beginn Darwinischen Denkens ging es den Evolutionsbiologen nicht viel anders, worauf Herr Meissner hinweist. Wenn ich die Mem-Theoretiker recht verstanden habe, muss es ihnen im Unterschied zu den frühen Genetikern gar nicht vorrangig darauf ankommen, das Verständnis von der Natur der „Replikatoren“ voranzutreiben, weil die rein funktionale Definition vollkommen ausreicht.

Selbstverständlich findet die genetische Replikation in einem komplexen Zellgefüge statt, weshalb man mit Herrn Groß der Auffassung sein kann, dass auch Gene nur kopiert werden, weil sie aus eigener Kraft dazu nicht in der Lage sind. Dennoch haftet diesem Prozess eine letztlich unverstandene Spontaneität an, in der viele das „Wunder des Lebens“ verorten – aber Meme? Meme werden imitiert, und zwar von interessierten Subjekten.

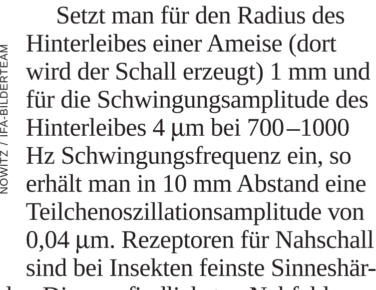
Es kommt in diesem Zusammenhang gar nicht so sehr auf die Klärung der von Herrn Rüggeberg diskutierten Frage an, was und wann heranwachsende Kinder von ihren Eltern, oder von ihrer Spielgruppe oder vom Kinderkanal lernen. Entscheidend ist die Selektivität des Imitationsprozesses. Die Vermehrung des genetischen Materials ist ein primär zufälliger, ungeplanter, zielblinder Vorgang, die der Meme aber im deutlichen Unterschied dazu ein von Anfang an selektiver, teleologer und häufig intentionierter Prozess. Wäre es anders, hätte Herr Kirschmann Recht, und wir müssten menschliche Verhaltensweisen finden, deren Entstehung durch keine evolutionsgenetischen Modelle verständlich wäre. Kooperation – auch in anonymen Großgruppen – ist dafür ein schlechter Kandidat. Sie kann unter Gen-Egoisten entstehen, auch ohne dass zuvor ein Mem uns Menschen aus dem „Griff der Gene“, wie es Herr Schüle ausdrückt, befreien musste.

Was Ameisen hören

Spektrogramm – Dezember 2000

Die Aussage, dass Feuerameisen die arteigenen Stridulationstöne als Nahfeldschall hören können, ist aus Gründen der Schallphysik und der Ameisenphysiologie vollkommen unmöglich.

Hören ist die Wahrnehmung von Schall entweder als Druckschwankungen oder als Oszillation der Luftteilchen. Ameisen besitzen keine Trommelfelle, also kommt höchstens die Luftoszillation als Schallreiz in Betracht. Diese ist in der Nähe der Schallquelle am stärksten.



NOWITZ / IFA-BILDERTEAM

Die Feuerameise hört keinen Luftschall.

Von einer gedachten pulsierenden Kugel sinkt die Amplitude der Teilchenoszillation mit dem Quadrat der Entfernung zur Schallquelle nach einer bestimmten Formel.

Setzt man für den Radius des Hinterleibes einer Ameise (dort wird der Schall erzeugt) 1 mm und für die Schwingungsamplitude des Hinterleibes 4 µm bei 700–1000 Hz Schwingungsfrequenz ein, so erhält man in 10 mm Abstand eine Teilchenoszillationsamplitude von 0,04 µm. Rezeptoren für Nahschall sind bei Insekten feinste Sinneshärchen oder die Antennenfühler. Die empfindlichsten Nahfeldhärchen kennen wir von Schmetterlingsraupen und Spinnen. Diese benötigen aber eine Teilchenoszillationsamplitude von mindestens 1 µm, um gereizt zu werden. Solche oder ähnliche Härchen sind von keiner Ameisenart bekannt. Da Fühler noch weniger empfindlich sind, kommen sie als Schallempfänger bei Ameisen wohl kaum in Betracht.

Auch alle bisherigen experimentellen Befunde decken sich damit. Sie zeigen, dass Ameisen sehr wohl auf ihre arteigenen Stridulationstöne ansprechen, wenn sie durch den Untergrund weitergeleitet werden, und zwar über Sensoren in den Beinen. Sobald man die Bodenleitung jedoch unterbricht und nur noch Luftschall zulässt, fallen die Verhaltensreaktionen aus.

Prof. Jürgen Tautz, Dr. Flavio Roces, Würzburg

Unlust an der Technik?

Forschung und Gesellschaft – November 2000

Die Unlust der Studenten an der Technik ist seit Jahren offenkundig. Obwohl dieser Sachverhalt für die Zukunft unseres Landes schwerwiegend ist, wird er kaum öffentlich diskutiert. Neben der häufigen Praxisferne der Lehrinhalte ist auf zwei andere Aspekte zu verweisen, die Ingenieurberufe wenig attraktiv machen: das öffentliche Ansehen und die politischen Einflüsse. Wie wurde bei jedem Defekt einer Toilette oder einer Tür im neu entwickelten ICE Spott über die Entwickler ausgeschüttet. Der geringste Fehler in einem Kernkraftwerk dient dazu, Misstrauen gegen eine ganze Branche zu schüren. Ist ein Beruf attraktiv, in welchem man wie beim Transrapid drei Jahrzehnte entwickelt, ohne jemals den praktischen Nutzen demonstrieren zu können? Und soll ich einem jungen Menschen das Studium der Nukleartechnik empfehlen, wenn die Regierung auf Grund ideologischer Prämissen diese zum Teufelszeug erklärt und aus ihr unumkehrbar aussteigen will?

Herbert Kern, Dogern

Erratum
Wenn Schnee schwach wird

Forschung und Gesellschaft – Februar 2001

Die Angaben zur Dichte von Schnee müssen korrekt lauten: Ihre Werte reichen von etwa 0,03 Gramm pro Kubikzentimeter bei leichtestem Neuschnee bis zu mehr als 0,5 Gramm pro Kubikzentimeter bei Firn.

Die Redaktion

Turbo im Ohr

Monatsspektrum – Januar 2001

Auf Seite 14 hat sich ein Fehler eingeschlichen: Die Bezeichnung „äußere Haarzelle“ in der Abbildung unten links ist falsch. Dort müsste „innere Haarzelle“ stehen.

Matthias Schäfer, Heidelberg

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 504-716



Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke, E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Layout: Sibylle Franz, Andreas Merkert, Natalie Schäfer (stv. Herstellerin), Karsten Kramarczik (Artwork Coordinator)
Online-Redaktion: Antje Findeklee, Elke Reinecke, Christoph Roloff,E-Mail: online@spektrum.com
Redaktionsassistenz: Cornelia Schenck, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 504-711, Fax (0 62 21) 504-716
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: GHALT@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Herstellung: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 504-730
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Markus Bossle Tel. (0 62 21) 504-741/742, E-Mail: marketing@spektrum.com
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: PD Dr. Udo Gansloßer, Bernhard Gerl, Dr. Stefan Hartung, Dr. Christoph P. Pöppe, Dr. Rainer Riemann, Peter Schütz.
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Vangerowstraße 20, 69115 Heidelberg Tel. (0 62 21) 504-60, Fax (0 62 21) 504-751.
Geschäftsführer: Dean Sanderson
Leser-Service: Marianne Blume; Tel. (0 62 21) 504-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft DM 12,90/sfr 12,90/öS 98,–; im Abonnement DM 142,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) DM 123,60. Die Preise beinhalten DM 10,80 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen DM 10,20 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung: Andreas Formen Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (06221) 504-748, Fax -758 Verkaufsberatung: Sabine Ebert, (06221) 504-749, Fax -758; verantwortlich für Anzeigen: Gabriele Reichard Kasernenstraße 67, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-2341/93, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Gunter-E. Hackemesser, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 84, Fax (0 40) 33 90 90; Hannover: Egon F. Naber, Sextrostraße 3-5, 30169 Hannover, Tel. (05 11) 9 88 47 14, Fax (05 11) 8 09 11 23; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Herbert Piehl, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Dirk Schaeffer, Markus Horn, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 82; Stuttgart: Erwin H. Schäfer, Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf Tel. (02 11) 8 87-23 84, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Zur Zeit gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 22 vom 1. Januar 2001.
Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von Giordano, Italien, Schünemann Verlag, Bremen, Gruner & Jahr, Hamburg und VDI-Nachrichten, Düsseldorf. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY100017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Denise Anderman, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

ATMOSPHÄRENFORSCHUNG

Ozonschwund und Klimaschaukel in Europa

Warum hat die Ozonschicht über Island in den letzten dreißig Jahren so gut wie gar nicht, im Alpenraum dagegen stärker als erwartet abgenommen? Die Antwort hat mit den milden Wintern in Europa zu tun.

Von Christof Appenzeller, Andrea Weiss und Johannes Staehelin

In den letzen Jahren gab es gar keine richtigen Winter mehr", ist eine landläufige Feststellung. Dass „früher" (in den sechziger Jahren) die Winter über Mitteleuropa kälter waren, können auch die Klimatologen bestätigen. Natürliche Klimaschwankungen, die ganze Erdregionen erfassen können, spielen für das Auftreten von kälteren oder wärmeren Jahrzehnten eine wichtige Rolle. Ein Beispiel einer solchen mehrjährigen Klimaschwankung ist als El-Niño-Southern-Oscillation (ENSO) bekannt. Eine Kopplung von Meeres- und Luftströmungen im äquatorialen Pazifik beeinflusst dabei die Witterung in Süd- und Nordamerika.

Für das europäische Klima gibt es eine ähnliche mehrjährige Schwankung: die Nordatlantische Oszillation (NAO), die vor allem im Winterhalbjahr klimawirksam ist. Sie geht mit Temperaturänderungen im gesamten nordatlantischen Bereich einher und zeigt sich in vielen wichtigen atmosphärischen, ozeanischen und ökologischen Größen, zum Beispiel in der Temperatur der Meeresoberfläche, den Niederschlagsmengen und der Länge der Vegetationsperioden. Meteorologen drücken sie durch einen Index aus, der über die Druckdifferenz zwischen dem Islandtief und dem Azorenhoch definiert ist. Ein hoher NAO-Index entspricht einem großen Druckunterschied. Als Folge davon wehen kräftigere Winde über dem Atlantik als im langjährigen Mittel und führen vom Ozean angewärmte Luft zum Europäischen Kontinent. In solchen Jahren sind die mittel- und nordeuropäischen Winter deshalb relativ mild. Bei niedrigem NAO-Index herrscht dagegen eine geringe Luftdruckdifferenz zwischen Island und Azoren. Statt einer warmen Weströmung vom Atlantik herrscht im Winter vermehrt eine kalte Strömung aus Russland nach Mitteleuropa vor und sorgt für frostige Temperaturen.

Folgen der Luftdruckverteilung über dem Nordatlantik

Die Nordatlantische Oszillation zeigte in den letzten dreißig Jahren eine Tendenz zu vermehrt positiven Phasen. Damit hat sie sowohl zur beobachteten Erwärmung in Europa als auch zu Trends in anderen Klimagrößen beigetragen. Doch das ist noch nicht alles: Wie wir zeigen konnten, beeinflusst die NAO auch die Dicke der Ozonschicht, die das Leben auf der Erde vor der schädlichen UV-Strahlung der Sonne schützt. (*Geophysical Research Letters, Bd. 27, S. 1131*).

Das Ozonloch über der Antarktis sorgt seit Mitte der achtziger Jahre fast jeden Herbst für neue Rekordmeldungen. Auch in unseren Breiten ist die Ozonschicht dünner geworden, allerdings weniger spektakulär. Der beobachtete Ozonrückgang seit den siebziger Jahren stimmt im Großen und Ganzen mit der Wirkung Ozon zerstörender Substanzen wie der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) überein, die sich aus chemischen Modellen ableiten lässt.

Allerdings gab es auch einige unerklärliche Abweichungen von den Aussagen der Modelle. Im Zeitraum von 1978 bis 1991 wurde zum Beispiel in der Schweizer Messstation Arosa im Monat März eine Abnahme der Ozonschicht von fünf Prozent pro Jahrzehnt festgestellt. Über Island (Messstation Reykjavik) ging die Ozonschicht im gleichen Zeitraum dagegen überhaupt nicht zurück, ja schien sogar anzusteigen. Dies steht in deutlichem Widerspruch zu den Aussagen der chemischen Modelle, wonach die Ozonzerstörung in hohen Breiten größer sein sollte als im Alpenraum. Wie lässt sich dieser Gegensatz erklären?

Wie wir feststellten, hängt er mit Veränderungen in der Dynamik der Atmosphäre zusammen, die mit der NAO gekoppelt sind und bisher nicht berücksichtigt wurden. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Lage der so genannten Tropopause. Das ist eine Luftschicht in etwa acht bis zehn Kilometern Höhe, welche die ozonarme Troposphäre, in der sich das tägliche Wetter abspielt, von der ozonreichen Stratosphäre trennt. Die genaue Höhenlage der Tropopause kann sich wetterabhängig nach oben oder unten verschieben. Diese Bewegung entspricht einer Veränderung des Tropopausendrucks, das heißt der Luftmasse pro Fläche über der Tropopause.

In einem Tiefdruckgebiet liegt die Tropopause tiefer als normal, sodass sich mehr stratosphärische und weniger troposphärische Luft in einer Säule befindet, die vom Erdboden bis zur Obergrenze der Atmosphäre reicht. Da die stratosphärische Luft mehr Ozon enthält, ist die Gesamtozon-Konzentration in einem Tief-

PHOTO TIARA

Im Schweizer Kurort Arosa sind auf einem Hausdach Instrumente zur Überwachung der Ozonschicht installiert.

druckgebiet höher als in einer Hochdruckzone. Schon 1929 hatten Gordon M. B. Dobson und Kollegen gezeigt, dass die tägliche Variation des Gesamtozons in den mittleren Breiten stark von der Verteilung der Hochs und Tiefs abhängt.

Diese Argumentation läßt sich auch auf langfristige Klimaänderungen anwenden. Indem die NAO die Luftdruckverteilung über der Nordatlantik-Region im Winter bestimmt, beeinflusst sie auch die mittlere Lage der Tropopause über den verschiedenen Gebieten Europas. Wenn in Jahren mit positivem NAO-Index das Islandtief besonders ausgeprägt ist, verläuft die Tropopause über dem Nordatlantik tiefer als im Durchschnitt. Über Mitteleuropa ist die Situation dagegen genau umgekehrt. Hier herrscht überdurchschnittlich hoher Luftdruck, sodass die Tropopause höher liegt als im langjährigen Mittel. Demnach sollte in Jahren mit positivem NAO-Index die Ozonkonzentration über dem Nordatlantik besonders hoch, in Mitteleuropa dagegen besonders niedrig sein.

Um diese theoretische Erwartung zu prüfen, werteten wir die Ozonmeßreihe von Arosa aus. Sie ist die längste der Welt. Da sie bereits Anfang der dreißiger Jahre beginnt, reicht sie bis in eine Zeit zurück, in der es noch keine Ozon zerstörenden FCKWs gab. Ergänzend dazu analysierten wir die Ozonmessungen der Station Reykjavik.

Das Ergebnis war eindeutig: In Jahren mit positivem NAO-Index wurde im Winter in Arosa weniger Gesamtozon registriert als in Jahren mit negativem NAO-Index; umgekehrt treten bei der Station Reykjavik in den Jahren mit positivem NAO-Index höhere und bei negativem NAO-Index niedrigere Ozonwerte auf.

Anthropogener Anteil am Ozonabbau

Demnach variieren die Gesamtozonwerte in der theoretisch vorhergesagten Weise mit der NAO. Nicht alle langfristigen Änderungen müssen somit auf menschliche Einflüsse zurückgehen. Das heißt freilich nicht, dass kein anthropogener Ozonabbau in mittleren Breiten stattgefunden hat. Er entspricht jedoch nicht einfach direkt der gemessenen Ozonabnahme. Um ihn bestimmen zu können, muss man vielmehr die natürlichen Fluktuationen berücksichtigen – insbesondere die Tatsache, dass der NAO-Index in den letzten Jahrzehnten überwiegend stark positive Werte hatte.

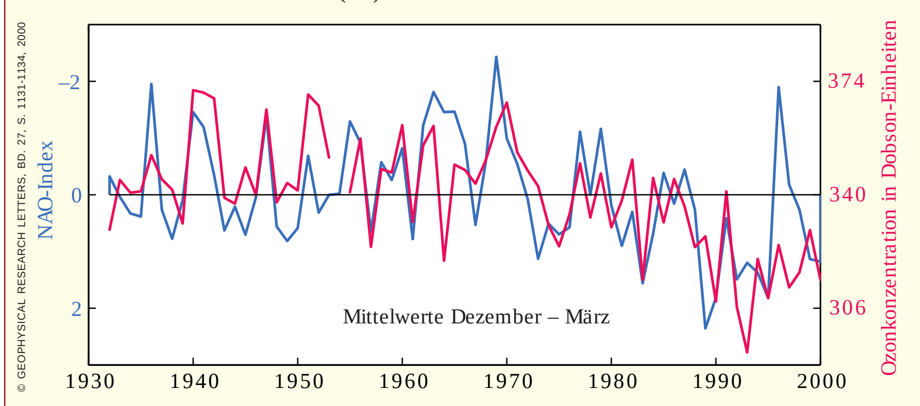
Wie unsere genauen Analysen ergaben, lässt sich ungefähr ein Drittel der Ozonschwankungen von Winter zu Winter auf die Variabilität der NAO zurückführen. Um den anthropogenen Anteil am Ozonschwund zu ermitteln, entwickelten wir ein statistisches Modell, das den NAO-Index (beziehungsweise den Tropopausendruck) explizit berücksichtigt; außerdem bezieht es andere Faktoren ein, von denen bekannt ist, dass sie den Ozongehalt der Atmosphäre beeinflussen – so den elfjährigen Sonnenfleckenzyklus, die quasi-biennale Oszillation und hochreichende Vulkanausbrüche.

Für Arosa konnten wir damit den vom Menschen verursachten Ozontrend neu berechnen. Für die Winter der letzten dreißig Jahre belief er sich auf 2,4 Prozent pro Jahrzehnt. Frühere Trendanalysen hatten die anthropogene Ozonzerstörung in Mitteleuropa um etwa ein Viertel überschätzt, weil sie die langfristigen Veränderungen in der Struktur der Atmosphäre nicht berücksichtigten.

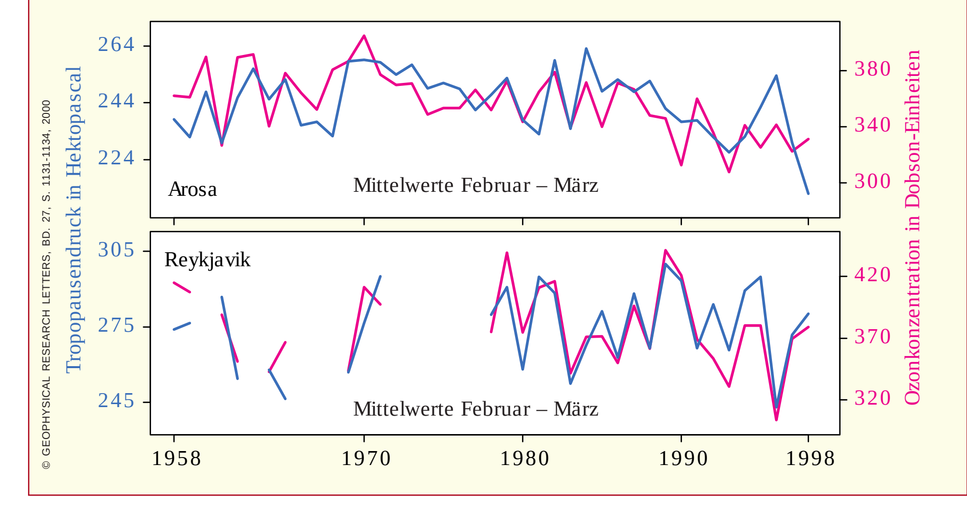
Revidiert werden müssen – allerdings in umgekehrter Richtung – auch die Trendberechnungen im nordatlantischen Gebiet, wo frühere Analysen kei- ▶

Wie das Wetter über dem Nordatlantik das Ozon in den Alpen beeinflusst

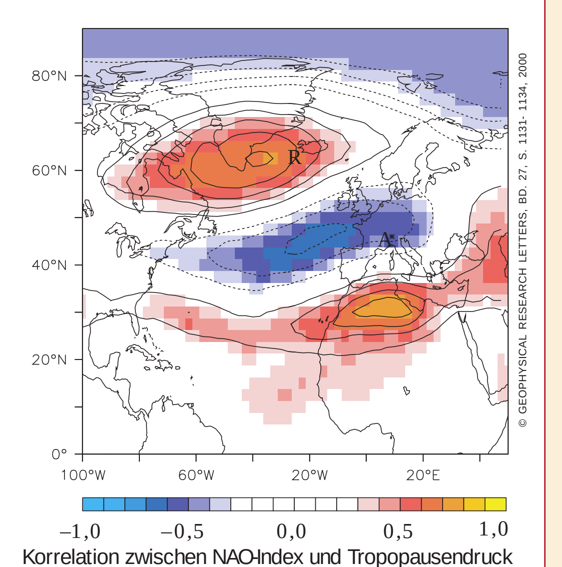
Ein Indikator für die Wetterverhältnisse im Bereich des Nordatlantiks ist der so genannte NAO-Index; er entspricht der Differenz zwischen dem Luftdruck über Island und den Azoren. Seit einigen Jahrzehnten dominieren die positiven NAO-Phasen gegenüber den negativen, was für die relativ milden Winter in Mitteleuropa mitverantwortlich ist. Diese Entwicklung fällt mit dem Beginn des Ozonschwunds Anfang der siebziger Jahre zusammen. Tatsächlich zeigt sich ein statistischer Zusammenhang zwischen NAO-Index (blau) und dem Gesamtozon-Gehalt der Atmosphäre über der Schweizer Messstation Arosa (rot).



Wie kommt es zu dieser Korrelation? Bei niedrigem Luftdruck ist die Tropopause – die Grenzschicht zwischen Tropo- und Stratosphäre – abgesenkt und bei hohem angehoben. Ein Maß für die Höhenlage der Tropopause ist der Tropopausendruck, der dem Luftdruck auf die Tropopause entspricht. Da die Stratosphäre wesentlich mehr Ozon enthält als die Troposphäre, steigt bei hohem Tropopausendruck der Ozongehalt der Luftsäule, während er bei niedrigem fällt. Deshalb hängt der Gesamtozon-Gehalt der Atmosphäre (blau) sowohl für Arosa als auch für Islands Hauptstadt Reykjavik eng mit dem Tropopausendruck (rot) zusammen.



nen nennenswerten Ozonschwund ergeben hatten. Nach unserem Modell beträgt die um natürliche Effekte bereinigte Ozonabnahme in Reykjavik im Winter nun 3,8 Prozent pro Jahrzehnt. Damit verschwindet zugleich der scheinbare Widerspruch zu den Vorhersagen der chemischen Modelle: Im Einklang mit ihnen ist der Wert für Reykjavik größer als der für Arosa.



Aus dieser Korrelationskarte ergibt sich, dass in Mitteleuropa ein stark positiver NAO-Index mit einem niedrigen Tropopausendruck und damit einer geringen Gesamtozon-Konzentration einhergeht (blau). Umgekehrt verhält es sich für Island und den gesamten Nordatlantik (rot). Die Berechnungen basieren auf Mittelwerten für die Winter 1958 bis 1998.

Natürliche Schwankungen über Zeiträume von mehreren Jahren oder Jahrzehnten hinweg können anthropogene Einflüsse also maskieren oder auch verstärken. Eine andere interessante Frage ist, worauf die langfristige Verschiebung der NAO zu positiven Phasen beruht. Auch sie könnte letztlich anthropogen verursacht sein – etwa durch die Emission von Treibhausgasen wie Kohlendioxid oder durch den Ozonabbau selbst. Ob das zutrifft, lässt sich bisher allerdings nicht entscheiden. ■

Christof Appenzeller *arbeitet als Klimadynamiker beim schweizerischen Wetterdienst MeteoSchweiz.* ***Andrea Weiss*** *ist Atmosphärenphysikerin und* ***Johannes Staehelin*** *Atmosphärenchemiker. Beide forschen an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.*

NACHGEHAKT

Ab wann haben Embryonen Menschenwürde?

Endlich gibt es sie – eine öffentliche Diskussion über Genethik und Embryonenschutz, die den Namen verdient. Lange schien es, als bliebe das Feld jenen selbstgewissen „Moralisten" überlassen, die im Namen angeblich unumstößlicher ethischer Normen eine befruchtete Eizelle grundsätzlich für unantastbar erklären. Da machte die FAZ letzten September James D. Watson zum öffentlichen Buhmann, indem sie einen verkürzten Auszug aus dessen Aufsatzsammlung „A Passion for DNA" in verfälschender Übersetzung ohne Quellenangabe abdruckte. Während der Bundespräsident seine Kritik an dem Mitentdecker der DNA-Struktur noch staatsmännisch verhalten formulierte, sprach der Tübinger Theologe Dietmar Mieth von einer „Ethik des Grauens". Der einstige Zukunftsminister der CDU Jürgen Rüttgers verstieg sich gar zu der Forderung, Watson den Nobelpreis nachträglich abzuerkennen. Dabei hatte dieser großenteils nur Dinge geäußert, die in Deutschland wie anderen westlichen Ländern seit langem juristisch abgesicherte Praxis sind.

Die Gilde der Genforscher ging dagegen in Deckung, weil sie angesichts der medienweiten Kampagne offenbar keine Chance sah, mit rationalen Argumenten durchzudringen. Sie musste vielmehr fürchten, mit jedem Widerspruch nur Öl ins Feuer der allgemeinen Entrüstung zu gießen. Benno Müller-Hill, einem emeritierten Genforscher an der Universität Köln und Watson-Schüler, blieb es überlassen, in einem Artikel in der FAZ zu beklagen, dass offenbar keiner seiner Kollegen den Mut fände, in der allgemeinen Hetzjagd Partei für jenen überragenden Wissenschaftler zu ergreifen, der immerhin eine der größten Entdeckungen dieses Jahrhunderts gemacht hat.

Die Woge der moralischen Verurteilung erreichte einen neuen Höhepunkt, als das britische Unterhaus Mitte Dezember mit großer Mehrheit erlaubte, Embryonen zur Gewinnung von Stammzellen zu klonen. Aus diesen sollten sich Gewebe züchten lassen, die Schwerkranken als Organ-Ersatz transplantiert werden könnten. Wieder ging ein fast einhelliger Schrei der Entrüstung durch die Medien, wurde der Ausverkauf der humanen Werte der abendländischen Kultur beschworen. Da war es schon viel, dass Frank Schirrmacher dem britischen Parlament in einem Kommentar in der FAZ bescheinigte, nicht leichtfertig oder aus naivem Fortschrittsglauben gehandelt, sondern eine ernsthafte, verantwortungsvolle Abwägung widerstreitender moralischer Forderungen vorgenommen zu haben; auch er mochte das Ergebnis indes nicht gutheißen.

Dann allerdings geschah ein kleines Wunder. Wenige Tage vor seinem Amtsantritt als Staatsminister für Kultur befasste sich der Philosoph Julian Nida-Rümelin in einem Beitrag für den Berliner Tagesspiegel mit der britischen Entscheidung. Zwar lehnte er sie gleichfalls ab, bestritt aber, dass einem wenige Tage alten Embryo bereits Menschenwürde zukomme; denn er verfüge noch nicht über die entscheidende Voraussetzung dafür, nämlich die Fähigkeit zur Selbstachtung. Das war in doppelter Hinsicht bemerkenswert: Zum einen widersprach erstmals ein ranghoher Vertreter aus der Politik und anerkannter Philosoph öffentlich der herrschenden Meinung in einem wichtigen Punkt; und zum anderen wurde der zentrale Begriff, mit dem die Befürworter eines unbedingten Embryonenschutzes operieren, kritisch hinterfragt.

Der designierte Kultur-Staatsminister bezog zwar die zu erwartenden medialen Prügel, schoß aber scharf zurück – mit dem Vorwurf einer mangelnden Diskussionskultur in Deutschland, in der jedes etwas differenziertere Argument gleich mit ideologischem Feldgeschrei niedergebrüllt werde.

Um eine rationale Debatte zu unterdrücken, werden mit dem Pathos moralischer Entrüstung Andersdenkende diskreditiert

Die heftigste Attacke auf Nida-Rümelin ritt in der „Zeit" der Philosoph Robert Spaemann, der sich bereits als Atomkraft- und Abtreibungsgegner einen Namen gemacht hat. Er warf dem Staatsminister vor, sich gegen das Bundesverfassungsgericht zu stellen, das dem Embryo vom Zeitpunkt der Zeugung an Menschenwürde zuerkenne. Ferner widersprach Spaemann der Verknüpfung von Menschenwürde und der Fähigkeit zur Selbstachtung und reklamierte unbedingten Respekt auch für die befruchtete Eizelle, die sich autonom auf eine erwachsene Menschengestalt entwickle, als Mitglied der Menschheitsfamilie.

Damit schien der Ansatz einer Minderheitenmeinung im Chor der Verfechter einer strikten „Menschheitsethik" wieder einmal erstickt. Doch es kam anders.

Eine Woche später meldete sich der Rechtsphilosoph Reinhard Merkel von der Universität Hamburg ebenfalls in der „Zeit“ zu Wort und machte klar, auf welch wackligen Füßen sowohl das Urteil des Bundesverfassungsgerichtes als auch die Argumentation Spaemanns stehen. Ein Zellknäuel, das niemals jene Eigenschaften hatte, welche die Würde eines Menschen begründen, und überhaupt zu keinerlei Empfindung fähig ist, könne in einem schweren ethischen Konfliktfall nicht denselben Schutz beanspruchen wie ein Träger dieser Eigenschaften. Diese Aussage belegte Merkel mit einem einfachen Beispiel: Wenn ein Feuerwehrmann bei einem Klinikbrand die Wahl hätte, zehn am Vortag im Reagenzglas befruchtete Embryonen oder einen Säugling zu retten, würde er sich ohne jeden Zweifel für den Säugling entscheiden.

Mit einem zweiten Szenario demonstrierte Merkel, welche absurden Folgen ein absoluter Embryonenschutz hat. Ein Genetiker entnimmt einem im Reagenzglas gezeugten Vierzellen-Embryo mit einer Pipette eine Zelle – etwa für eine Präimplantations-Diagnostik. Da dies nach dem deutschen Embryonenschutzgesetz verboten ist, besinnt er sich wenige Sekunden später anders und bringt die Zelle zurück in den Verband. Rein medizinisch-biologisch ist damit die alte Situation wiederhergestellt und kein Schaden entstanden.

Doch nach deutschem Recht hat der Genetiker drei schwere Straftaten begangen. Erstens hat er den Vierzellen-Embryo missbräuchlich zu einem anderen Zweck als seiner Erhaltung verwendet, nämlich geteilt. Zweitens hat er, was wesentlich schlimmer ist, einen Embryo geklont; denn aus der abgetrennten Zelle hätte sich ein genetisch identischer Zwilling desjenigen Menschen entwickeln können, der aus den drei verbliebenen Zellen entstanden wäre. Die schlimmste Straftat ist jedoch die dritte: Beim vermeintlichen Beheben des Schadens, dem Zurückstecken der Zelle in den Verband, hat der Genetiker einen Menschen mit Recht auf Leben und Würde getötet – nämlich denjenigen, der aus der abgetrennten Einzelzelle hervorgegangen wäre.

Bisher verstanden es die genethischen Totalverweigerer, mit dem Pathos moralischer Entrüstung Andersdenkende von vornherein zu diskreditieren und so jede unvoreingenommene Debatte zu unterdrücken. Nun da der Diskurs in Gang gekommen ist, bleibt zu hoffen, dass sich die besseren Argumente durchsetzen.

Gerhard Trageser

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

ASTRONOMIE

Heiße Strahlung eines Schneeballs

Erstmals gelangen Schnappschüsse vom Zerfall eines Kometen. Außerdem ließ sich das Rätsel lösen, warum solche vagabundierenden Eisklumpen im Sonnensystem hochenergetische Röntgenstrahlung aussenden.

Von Abigail Katona

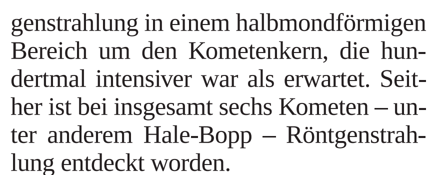
Kometen gehören zu den eindrucksvollsten Naturerscheinungen. Staunen erregen vor allem ihre leuchtenden Schweife, die viele Millionen Kilometer lang werden können. Sie bilden sich, wenn ein Komet auf seiner Bahn in die Nähe der Sonne gelangt. Deren Strahlung lässt aus seinem festen Kern Gas und Staub verdampfen, die dann selbst leuchten oder Sonnenlicht reflektieren.

Die Kometenkerne sind dagegen völlig unscheinbar. Sie ähneln schmutzigen Schneebällen. Den Hauptbestandteil bilden verschiedene Arten von gefrorenen Gasen – davon etwa 80 Prozent Wassereis. Hinzu kommen Staubteilchen mit Durchmessern von unter einem Mikrometer bis zu Gesteinsbrocken von einigen Metern. Die Temperatur der mehrere Kilometer dicken Himmelskörper liegt deutlich unter dem Gefrierpunkt.

Jeder feste Körper sendet Strahlung aus, deren Frequenz davon abhängt, wie warm er ist: Je höher die Temperatur, desto energiereicher und somit kurzwelliger die Emission. Menschen mit ihrer Körpertemperatur von 37 Grad Celsius geben Infrarotstrahlung mit einer Wellenlänge von knapp drei Mikrometern ab. Die rund 5700 Grad Celsius heiße Sonne emittiert vor allem gelb-grünes Licht mit einer Wellenlänge von etwa 500 Nanometern. Um Röntgenstrahlung mit Wellenlängen unter zehn Nanometern abzugeben, muss ein Körper mehrere Millionen Grad heiß sein. Auf Kometenkerne trifft das ganz gewiss nicht zu.

Sechsfach geladener Sauerstoff

Dennoch beobachtete eine Forschergruppe um Carey Lisse vom Goddard-Raumflugzentrum der Nasa 1996 den Kometen Hyakutake mit dem Röntgensatelliten Rosat der Europäischen Raumfahrtbehörde Esa. Sie vermuteten, dass das Objekt hochenergetische Strahlung von der Sonne streuen könnte. Zu ihrem Erstaunen fanden die Wissenschaftler variable Röntgenstrahlung in einem halbmondförmigen Bereich um den Kometenkern, die hundertmal intensiver war als erwartet. Seither ist bei insgesamt sechs Kometen – unter anderem Hale-Bopp – Röntgenstrahlung entdeckt worden.



Woher stammt sie? Erst letztes Jahr konnten Lisse und seine Kollegen dieses Rätsel lösen. Mit dem Advanced CCD Imaging Spectrometer (Acis) auf dem Röntgensatelliten Chandra untersuchten sie am 14. Juli 2000 den Kometen Linear (C/1999 S4) insgesamt zweieinhalb Stunden lang. Der Kometenkern ist auf dem erhaltenen Bild nicht zu sehen, wohl aber die gasförmige Region, die ihn umgibt (Bild unten). Demnach emittierte auch Linear Röntgenstrahlung.

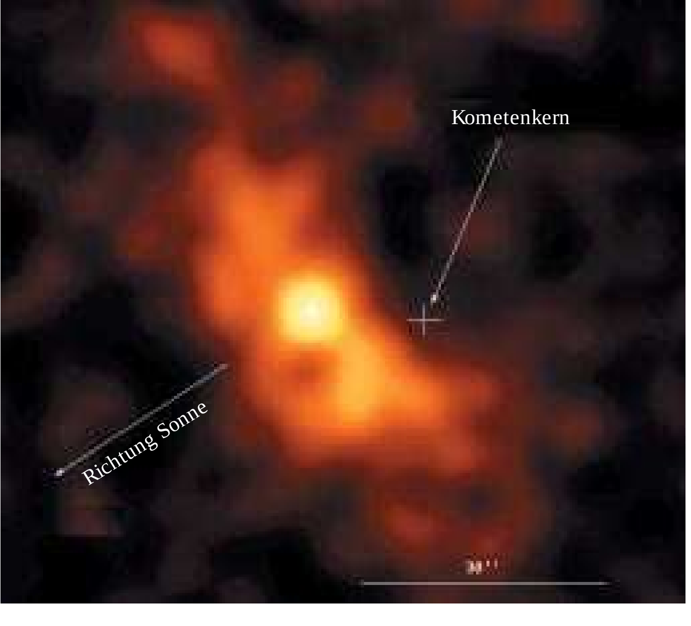
Mit dem Spektrometer ließ sich in diesem Fall präzise bestimmen, welche Arten von Atomen für die hochenergetischen Emissionen verantwortlich sind. Danach waren die Quellen im Wesentlichen stark ionisierter Sauerstoff und Stickstoff. So fanden sich Sauerstoff-Ionen, die alle ihre äußeren Elektronen verloren hatten und somit eine sechsfach positive Ladung trugen.

Dies war eine weitere Überraschung. Atome können nur in einer sehr energiereichen Umgebung, in der sie heftigen Stößen oder starker Strahlung ausgesetzt sind, alle äußeren Elektronen abgeben. Die relativ sanfte Verdampfung von Gas und Staub aus dem Kometenkern durch Sonnenlicht reicht dazu bei weitem nicht aus.

Es gibt jedoch eine andere Quelle. Hochgeladene Ionen entstehen fortwährend in der äußeren Atmosphärenschicht der Sonne: der Korona. Diese erreicht Temperaturen von etwa einer Million Grad Celsius. Selbst von der enormen Gravitation unseres Zentralgestirns kann sie deshalb nicht festgehalten werden. Ihre Ränder fliegen als Sonnenwind mit Geschwindigkeiten zwischen 400 und 800 Kilometern pro Sekunde in alle Richtungen davon. Der Hauptteil der entweichenden Partikel besteht aus Protonen und Elektronen, aber etwa ein Prozent eben aus stark geladenen Ionen.

Nähern sich diese einem Kometen, entreißen sie dessen Atomen und Molekülen negativ geladene Elektronen. Ein eingefangenes Elektron besetzt dabei zunächst einen hoch angeregten Zustand. Von diesem fällt es dann auf ein niedrigeres Niveau. Dabei emittiert es Röntgenstrahlung einer charakteristischen Frequenz, die der Energiedifferenz zwischen den beiden Zuständen entspricht. Den gesamten Prozess bezeichnen Astronomen als Ladungsaustausch-Reaktion.

„Diese Beobachtung zeigt, wie Kometen Röntgenstrahlung erzeugen“, er-



ALLE BILDER: NASA

In einem halbmondförmigen Bereich um den Kern des Kometen Linear entdeckte der Satellit Chandra Röntgenstrahlung. Weiß steht auf diesem Falschfarbenbild für die stärkste, rot für die geringste Intensität. Wie sich herausstellte, entsteht die Strahlung bei der Reaktion hochgeladener Ionen des Sonnenwindes mit Kometenstaub.

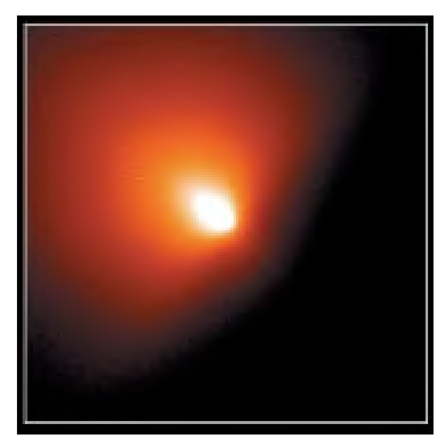
(Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

klärt Lisse, der inzwischen am Space Telescope Science Institute tätig ist. „Nun können wir die Chemie des Sonnenwindes untersuchen und Röntgenstrahlung von den Atmosphären von Kometen und Planeten wie der Venus beobachten.“

Doch Linear hatte den Forschern noch mehr zu bieten. Mit dem Weltraumteleskop Hubble gelang es, eine Art Vulkanausbruch auf dem Kometen zu beobachten, kurz bevor er am 26. Juli letzten Jahres den sonnennächsten Punkt seiner Bahn erreichte. Dabei wurde ein großes Stück seiner Kruste abgestoßen, das wie der Korken aus einer Sektflasche davonschoss. Zugleich entwich eine Staubwolke, die so viel Sonnenlicht reflektierte, dass der Komet für mehrere Stunden deutlich heller erstrahlte (Bilderserie).



Zwischen dem 5. und dem 7. Juli 2000 sprengte der Komet Linear ein größeres Stück Materie ab. Es ist als kleiner heller Fleck zu erkennen, der den Schweif entlangwandert.





Zwar wussten Astronomen bereits, dass Kometen zerbrechen können, doch nie zuvor war es gelungen, den Vorgang direkt zu beobachten. Sogar der weggeschleuderte Brocken ist auf den Hubble-Bildern zu sehen. Offenbar ereignen sich solche Ausbrüche regelmäßig auf Kometen. Die Wissenschaftler halten es jedenfalls für äußerst unwahrscheinlich, dass sie rein zufällig einen einzigartigen Vorgang beobachtet haben.

Die Hubble-Schnappschüsse werfen damit auch ein neues Licht auf die Struktur und Zusammensetzung von Kometenkernen. Sie bestätigen ein Modell von Harold Weaver und seinen Mitarbeitern an der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland), wonach Kometenkerne aus hausgroßen Brocken bestehen, die nur lose zusammenhalten. Diese sollen sich ihrerseits vor rund 4,6 Milliarden Jahren, als das Sonnensystem sich gerade erst formierte, aus mikrometergroßen Staubteilchen gebildet haben.

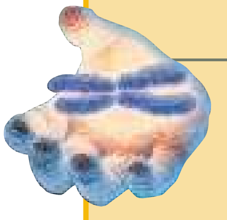
Ein solcher Brocken, von Weavers Gruppe Kometesimal genannt, könnte ▶

sich bei der Explosion gelöst haben. „Beobachtungen des Kometen Hyakutake zeigten auch Fragmente, die den Schweif entlangwanderten“, erklärt Weavers Mitarbeiter Paul Feldman. „Einige französische Forscher wiesen nach, dass es sich dabei gleichfalls um hausgroße Kometesimale handeln könnte.“

Das weitere Schicksal von Linear passt in dieses Bild. Nach seiner Sonnenumrundung schien der Komet zunächst verschwunden. Doch dann konnte er auf Hubble-Bildern wieder ausgemacht werden: als Armada von gut einem Dutzend Trümmern. Der Kometenkern war also anscheinend völlig in Kometesimale zerfallen. Normalerweise genügt die schwache Gravitation in dem Verbund, die Bausteine zusammenzuhalten. Nähert sich der Komet aber der Sonne, erhitzt diese das Eis, sodass es verdampft und in Form heftiger Gasströme entweicht. Diese Jets, die dem Wasserstrahl eines Gartenschlauchs ähneln, können schließlich auch die größeren Brocken mitreißen. ■

Abigail Katona *ist Diplom-Physikerin und freie Wissenschaftsjournalistin in Mainz.*

Serie: Die Botschaft des Genoms (Teil VI)



Anlässlich der Entschlüsselung des menschlichen Erbguts stellen wir zwölf darin codierte Proteine in einer Serie beispielhaft vor.

Elongationsfaktor 2

Rangierer in der Eiweißfabrik



GRAFIK: JEFF JOHNSON

Michael Groß *ist Biochemiker in Oxford (England)*

Die Herstellung von Proteinen ist wohl der wichtigste Vorgang in einer Zelle. Deshalb verwundert es nicht, dass dafür eigene Synthesemaschinen existieren. Diese so genannten Ribosomen durchlaufen immer wieder eine bestimmte Schrittfolge und verlängern dabei die wachsende Aminosäurekette jeweils um ein Glied.

Auf diesem Rundweg, den Biochemiker als Elongationszyklus bezeichnen, sind zwei Energiebarrieren zu überwinden, was mit reinen Ribosomen etliche Sekunden erfordern würde. Der Proteinsynthese-Apparat der Zelle kann jedoch etwa fünf Durchgänge pro Sekunde absolvieren. Das verdankt er zwei Enzymen: den Elongationsfaktoren EF-1 und -2. Sie gehören in Zellen, die sich rasch teilen, zu den häufigsten Proteinen.

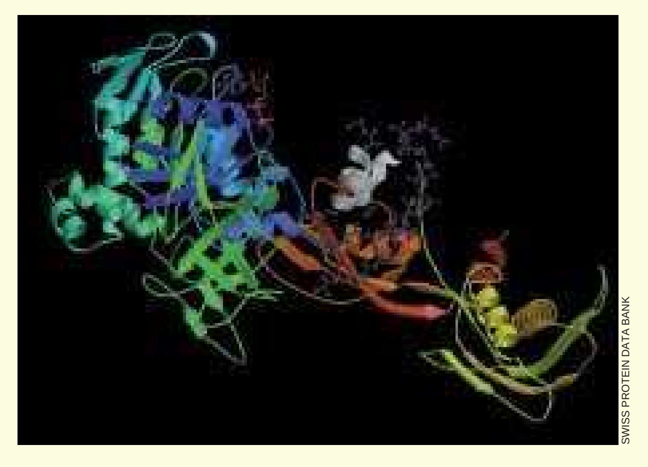
Die Funktion des EF-2 ist unkomplizierter als die des nahe verwandten EF-1 und soll daher hier als Modellbeispiel dienen. Wenn das Ribosom die Verknüpfung zwischen der existierenden Kette und der neu hinzukommenden Aminosäure herstellt, setzt es nicht etwa einen neuen Bauklotz auf den vorhandenen Turm, sondern verschiebt den ganzen Turm, um ihn auf den neuen Klotz zu hieven. Demzufolge befindet sich die um eine Einheit verlängerte Kette anschließend an der „falschen“ Bindungsstelle, nämlich der für Aminosäuren (A) statt für Peptidketten (P). Damit der Zyklus von vorne beginnen kann, muss sie zurück in die P-Stelle verschoben werden, sodass die A-Stelle wieder frei wird für die Aufnahme einer neuen Aminosäure samt Anhang (der zugehörigen Transfer-RNA sowie eines Moleküls EF-1).

Für diese so genannte Translokation sorgt der Elongationsfaktor 2. Er beinhaltet eine Domäne, die zusammen mit einem gebundenen Molekül Guanosintriphosphat (GTP) als Schalter wirkt. Während der Faktor bei der Translokation hilft, spaltet er von dem GTP gleichzeitig ein Phosphat ab. Als Folge davon ändert er seine räumliche Gestalt, verliert seine Affinität zum Ribosom und löst sich ab. Dadurch wird verhindert, dass er nach getaner Arbeit die Translokation wieder rückgängig macht; denn wie jeder echte Katalysator bevorzugt er keine bestimmte Reaktionsrichtung – er erleichtert den Vorgang selbst ebenso wie seine Umkehrung.

Steckbrief

- ➤ Molekulargewicht: 95338
- ➤ Aminosäuren: 858
- ➤ 5 Domänen
- ➤ Translokation, GTP-Abbau
- ➤ Chromosom Nr. 19

Der bakterielle Elongationsfaktor 2 enthält ein Schaltelement – die Domäne 1 (links oben) – und einen beweglichen Arm: die Domänen 3, 5 (Mitte) und 4 (rechts unten).



SWISS PROTEIN DATA BANK

Bisher konnten nur von den bakteriellen Elongationsfaktoren die dreidimensionalen Strukturen aufgeklärt werden. Bei ihrem Vergleich zeigt sich eine Kuriosität, deren tiefere Bedeutung bisher unklar ist: Das größere, für die Translokation zuständige Enzym enthält eine Domäne, die wie eine Karikatur der an das kleinere EF-1 gebundenen Transfer-RNA aussieht. Dieses „molekulare Nachäffen“ wurde bei den Elongationsfaktoren entdeckt, seither aber auch bei anderen Systemen gefunden.

Das menschliche EF-2 dürfte sehr ähnlich aussehen wie das der Bakterien. Außerdem besitzen auch wir Gene für bakterielle Elongationsfaktoren. Die von Bakterien abstammenden Mitochondrien, die Kraftwerke unserer Zellen, stellen immer noch eine geringe Zahl von Proteinen von ihrem eigenen, über Jahrmillionen geschrumpften Genom selbst her. Daher enthält unser Erbgut nicht nur die Bauanleitung für den für höhere Organismen typischen Proteinsynthese-Apparat, sondern auch für sämtliche Komponenten der bakteriellen Variante. Sie alle muss das Mitochondrion mühsam importieren, nur um seinen bescheidenen Satz an hausgemachten Proteinen synthetisieren zu können.

NACHTRAG

„Noah“ ist tot

Auch wenn das „Arche-Noah-Projekt“ gelingen sollte, werden gefährdete Arten dadurch nicht gerettet.

Das Gaur-Kalb „Noah“ sollte das Erste einer Schar geklonter Wildtiere sein, die zur Rettung ihrer eigenen bedrohten Art beitragen würden (siehe „Die neue Arche Noah“, Spektrum der Wissenschaft, 1/2001, S. 34). Der Clou an dem Programm amerikanischer Unternehmen: Weibchen fremder Arten sollen die geklonten Feten austragen. Doch nur zwei Tage nach seiner Geburt Anfang Januar starb der kleine Gaur, ein seltenes asiatisches Wildrind, an einer Darminfektion.



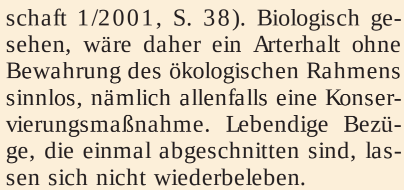
ADVANCED CELL TECHNOLOGY

Lebte nur zwei Tage: Gaur-Klon „Noah“

Die beteiligten Forscher werten ihr Unterfangen dennoch als Erfolg. Das Kalb – aus einer Hautzelle eines acht Jahre zuvor gestorbenen fünfjährigen Gaur-Bullen und der entkernten Eizelle eines Hausrindes geschaffen – war anscheinend lebensfähig und wirkte zunächst gesund und mobil. Auch seine Leihmutter, ein Hausrind, überstand das Experiment offenbar unbeschadet.

Damit dürfte erwiesen sein: Prinzipiell lassen sich gefährdete Tiere durch Klonen mit Hilfe anderer Arten vermehren. Zwar blieb „Noah“ von fast 700 geklonten Embryonen als Einziger übrig. Doch auch die Vermehrung von gewöhnlichen Hausrindern gelingt mit der gleichen Methode bisher nur in einem winzigen Bruchteil der Versuche. Die Hürde im Arche-Noah-Projekt ist also nicht so sehr die Artgrenze, sondern schlicht die Beherrschung der biologischen Vorgänge bei dieser Form der künstlichen Vermehrung. Die Wissenschaftler werden die Hindernisse mehr und mehr zu beseitigen wissen.

Die amerikanischen Forscher wollen daher auch nicht aufgeben. Schon für dieses Jahr planen sie neue Klonversuche mit gefährdeten oder vor kurzem ausgestorbenen Tieren. Manche Zoologen halten diesen „Rettungsansatz“ allerdings schon deswegen für absurd, weil fremdgeklonte Tiere das, was sie an arteigenem oder populationsspezifischem Verhalten erst lernen müssten – und das betrifft bei Säugetieren sehr vieles –, ohne enge Beziehungen zu Angehörigen ihrer eigenen Art gar nicht erwerben (siehe Kommentar in Spektrum der Wissenschaft 1/2001, S. 38). Biologisch gesehen, wäre daher ein Arterhalt ohne Bewahrung des ökologischen Rahmens sinnlos, nämlich allenfalls eine Konservierungsmaßnahme. Lebendige Bezüge, die einmal abgeschnitten sind, lassen sich nicht wiederbeleben.



Solche Einwände werden die Begeisterung von Klon-Forschern für derartige Projekte wohl nicht schmälern. Auch wenn es schwer fällt, den Gedanken nachzuvollziehen: Sie setzen sich tatsächlich zum Ziel, mit den künstlich geschaffenen Tieren die Zeit zu überbrücken, bis es wieder passende Ökosysteme geben wird. Eigentlich könnte man dann aber auch mit dem Klonen so lange warten und nur Gewebeproben aufheben. Denn wo würden die Herden aus Tausenden von Klonen so lange untergebracht? Vor allem aber: Sollte man den Generationen von Tieren die eingeschränkten Lebensbedingungen einer Haltung in Gefangenschaft wirklich wünschen? Zumal nicht absehbar ist, ob die verschwundenen Lebensräume jemals wiederentstehen.

An geklonte Hausschafe und Hausrinder haben wir uns inzwischen schon fast gewöhnt. Geklonte Gaure, Steinböcke oder Pandas werden nicht mehr für so viel Sensationsmeldungen sorgen wie 1997 das erste Klonschaf „Dolly“. In einigen Jahren werden solche Tiere wohl in den Zuchtstationen oder Zoos leben. Mit Arterhaltung hat dies aber letztlich wenig zu tun.

Adelheid Stahnke

Die Autorin ist Redakteurin bei Spektrum der Wissenschaft.

SINNESPHYSIOLOGIE

Antennen für den sechsten Sinn?

Geruchsfreie „Duftstoffe“ können unser Sexualverhalten steuern. Erstmals gibt es nun Hinweise auf Rezeptoren, über die sie ihre Botschaft an die Frau oder den Mann bringen.

Von Olaf Schmidt

Sie sind klein, flüchtig und geruchlos – und können am Beginn einer wunderbaren Partnerschaft stehen: Pheromone. Als chemische Botenstoffe, die sich durch die Luft verbreiten, dienen sie der lautlosen und unsichtbaren Kommunikation zwischen den Organismen einer Art. Dabei steuern sie so wichtige Vorgänge wie das Sexual- oder das Alarmverhalten. Allgemein werden Pheromone zwar als Duftstoffe bezeichnet, aber sie vermitteln keinen Geruch. Wer sie „riecht“, nimmt sie also nicht bewusst wahr.

Das eindrucksvollste Beispiel für einen Sexuallockstoff und seine Wirkung liefert die Wildform des Seidenspinners (*Bombyx mori mandarina*). Die Weibchen sondern über eine Drüse an ihrem Hinterleib die Verbindung Bombykol ab. Selbst über mehrere Kilometer hinweg kann dieses Pheromon ein Männchen anlocken. Und schon ein einziges Molekül genügt, um bei dem potenziellen Freier das volle Programm einzuschalten: Er fliegt los, folgt dem Konzentrationsgradienten an Bombykolmolekülen und beginnt bei der Ankunft am Ziel unverzüglich mit der Kopulation.

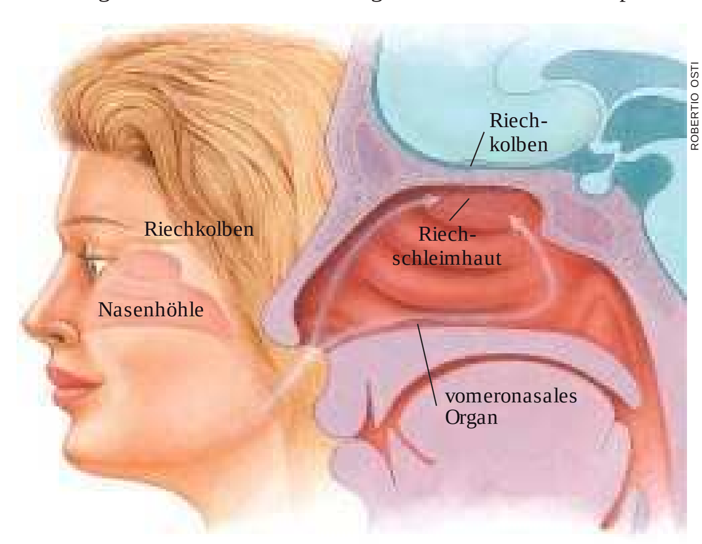
In welchem Maße auch der Mensch auf Pheromone „fliegt“ ist nach wie vor strittig. So reizvoll der Gedanke seit langem scheint, dass im menschlichen Se- ▶

xualleben chemische Signalstoffe mitmischen – die ersten überzeugenden Hinweise darauf gibt es erst seit 1998 (*Nature, Bd. 392, S. 177*). Martha K. McClintock und Kathleen Stern von der Universität Chicago gingen damals einer Alltagsbeobachtung nach: Leben Frauen über längere Zeit in Wohngemeinschaften zusammen, können sie ihren Menstruationszyklus synchronisieren.

Die US-Wissenschaftlerinnen untersuchten das Phänomen, indem sie die Ausdünstungen aus den Achselhöhlen während der späten Follikelphase mit Wattebäuschen aufnahmen. Anschließend rieben sie das Stoffgemisch anderen Frauen unter die Nase, ohne ihnen zu sagen, was da auf ihre Oberlippen aufgetragen wurde. Bei den Empfängerinnen stieg daraufhin der Spiegel an luteinisierendem Hormon („Gelbkörperreifungshormon") schneller an, sodass sich die Zyklusdauer verkürzte. Dagegen verzögerten Substanzen, die die Spenderinnen während des Eisprungs abgaben, einen Anstieg des Hormons und verlängerten dadurch den Zeitraum bis zur nächsten Menstruation. Zwar legten diese Versuche nahe, dass Menschen grundsätzlich über flüchtige chemische Substanzen unbewusst Informationen austauschen können, aber welche Komponenten von Achselschweiß die Botschaft übermitteln, war nach wie vor unbekannt.


JAMIE HARRON / CORBIS / PICTURE PRESS LIFE

Seidenspinner-Männchen können mit ihren Antennen selbst einzelne Pheromon-Moleküle „riechen".



ROBERTIO OSTI

Das vomeronasale Organ, mit dem Mäuse Pheromone wahrnehmen, ist beim Menschen verkümmert.

Alle Versuche, die physiologische Grundlage für den „richtigen Riecher" zu identifizieren, blieben bis vor kurzem erfolglos. Doch nun glauben Peter Mombaerts und seine Kollegen von der Rockefeller-Universität in New York sowie der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) zumindest die menschlichen Pheromon-Antennen aufgespürt zu haben (*Nature Genetics, Bd. 26, S. 18*). Sie bedienten sich dazu einer bei Genetikern beliebten Vorgehensweise. Erfahrungsgemäß lassen sich viele Gene beim Menschen identifizieren, weil sie bekannten Erbfaktoren aus anderen Arten – wie der Maus oder der Ratte – noch sehr ähnlich sind. Im Experiment nehmen die Wissenschaftler dann ein Stück des Nagergens und durchsuchen wie mit einem Lichtkegel damit das menschliche Erbgut nach einer vergleichbaren DNA-Sequenz. Auf diese Weise spürten Mombaerts und seine Kollegen mit einem Teil des Gens für den Pheromon-Rezeptor bei Mäusen acht ähnliche Abschnitte im menschlichen Erbgut auf.

Allerdings erfüllte nur einer davon die Anforderungen an ein funktionstüchtiges Gen. Die restlichen sieben stellten so genannte Pseudogene dar: Sequenzen, die zu viele Defekte aufweisen, als dass sie noch eine lesbare Bauanleitung für einen Eiweißstoff enthalten könnten. Die Forscher übersetzten die Erbinformation ihres einzigen Kandidaten in ein Protein, verglichen es mit dem Molekül der Maus und errechneten die Verwandtschaft zwischen beiden: Die 313 Aminosäure-Bausteine des menschlichen Eiweißstoffes erwiesen sich als zu 28 Prozent identisch mit der Aminosäurenfolge bei der Maus und immerhin noch zu 47 Prozent ähnlich zu ihr. Die Werte sind zwar eindeutig, liegen allerdings eher im unteren Bereich dessen, was an genetischer Verwandtschaft zwischen Nager und Mensch möglich ist. Wegen dieser „Homologie" genannten Ähnlichkeit erhielt die Sequenz den schmucklosen Namen V1RL1 (für „vomeronasal" und „rodent-like", das heißt „zum Sensorsystem für Pheromone gehörend" und „nagerähnlich"). Innerhalb des humanen Erbguts fanden die Forscher keine weiteren Verwandten zu V1RL1; das Gen scheint also einmalig zu sein und keiner übergeordneten Familie anzugehören.

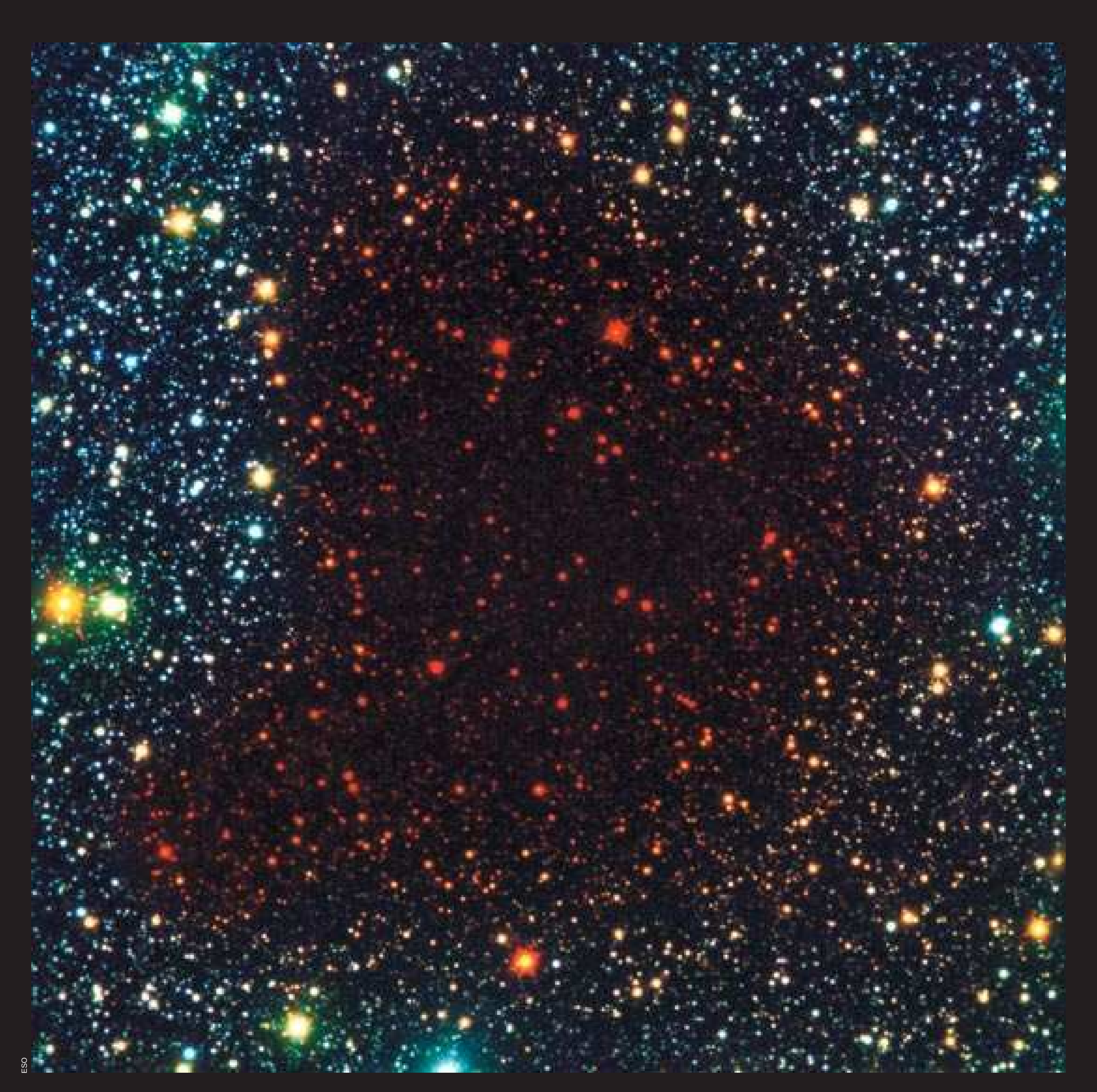
Als Nächstes wiesen Mombaerts und seine Kollegen nach, dass die gefundene Sequenz in mehreren Geweben auch ausgeprägt, das entsprechende Protein also tatsächlich hergestellt wird. Bezeichnenderweise geschieht das vor allem in der Nasenschleimhaut, in geringerem Maße aber auch im Gehirn und in der Lunge. Das erhärtet den Verdacht, dass V1RL1 als Gen für einen Pheromon-Rezeptor fungiert.

Der wirkt zur Zeit jedoch noch regelrecht heimatlos: Es fehlen Hinweise auf ein spezielles Sinnesorgan, in das er von Rechts wegen gehört. Bei der Maus ist es das so genannte vomeronasale Organ. Es liegt in einem Schleimhautschlauch im Nasenraum. Zwar haben Volker Jahnke und Hans-Joachim Merker von der Humboldt-Universität Berlin 1998 gezeigt, dass sich diese Struktur auch während der Embryonalzeit des Menschen entwickelt und unmittelbar nach der Geburt noch gut ausgebildet ist. Beim Heranwachsen verkümmert sie jedoch (Bild links). Vor allem fehlen Nervenzellen, um die Sinneswahrnehmung weiterzuleiten – sie endet quasi in einer Sackgasse.

Möglicherweise empfängt aber nicht nur das vomeronasale Organ Pheromon-Moleküle. Von Schweinen und Kaninchen ist bekannt, dass sie die Moleküle über ihren normalen Geruchssinn wahrnehmen können. Bis die Wissenschaft das Geheimnis eines möglichen „Liebescocktails" und seiner Wirkungsweise beim Menschen gelüftet hat, ist es also noch ein weiter Weg. Aber die ersten Schritte sind getan. ■

***Olaf Schmidt** ist promovierter Molekularbiologe und lebt als Wissenschaftsjournalist in München.*

Blick durch eine Dunkelwolke

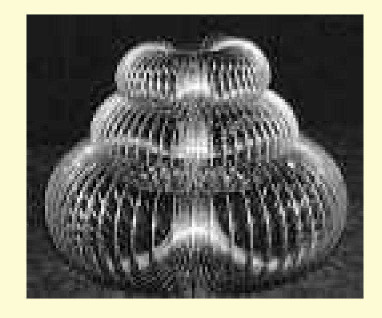


ESO

Mit Teleskopen der Europäischen Südsternwarte Eso in Chile konnte ein Team um Joao F. Alves einen einzigartig detaillierten Blick durch die Dunkelwolke Barnard 68 werfen. Sie ist im optischen Bereich undurchsichtig, weil ihre Staubteilchen das Licht dahinter stehender Sterne streuen und daher nur den infraroten Anteil durchlassen. Diese zusammengesetzte Falschfarbenaufnahme zeigt Objekte im optischen Bereich blau, im nahen Infrarot grün und im Infrarot rot. Mit einer Entfernung von nur 410 Lichtjahren ist Barnard 68 eine der nächstgelegenen Dunkelwolken. Anhand der Durchlicht-Aufnahme konnten Alves und Kollegen die genaue Staubverteilung ermitteln. Dabei zeigte sich, dass der Druck in der Wolke gerade der Gravitationskraft die Waage hält. Demnach steht das Objekt, das insgesamt die doppelte Masse der Sonne hat, offenbar kurz davor, zu einem Stern zu kollabieren.

Science and Fun

Spektrum DER WISSENSCHAFT



DREIFACH-TORUS

Diese drei Tori in verschiedenen Größen bieten viel. Aus schraubenförmig gedrehten Metallbändern gewickelt, können sie einander durchdringen – und auseinander hervorspringen. Ein ergiebiges Spielzeug für Erwachsenenfinger; **DM 99,–**



LORIOT-ARMBANDUHR

Schwarzes Lederarmband mit geprägter Loriot-Signatur, Edelstahlgehäuse, wasserdicht bis 3 atm, 1 Jahr Garantie; **DM 168,–**.





NUSSKNACKER „STEINSCHLAG“

Mit dem Design-Nussknacker knakken Sie selbst die härtesten Nüsse. Holzsockel 9 × 9 cm, Höhe 26 cm; **DM 84,–**.

RAUMSTATION ISS

Der Bau der Internationalen Raumstation ISS wird das größte von Menschenhand geschaffene Objekt außerhalb der Erde darstellen. Sie können schon jetzt aus 183 Einzelteilen im Maßstab 1:144 Ihre eigene Raumstation realisieren (745 mm Länge, 500 mm Spannweite, 406 mm Höhe). Der Modellbaukasten enthält unter anderem Aluminium-Vierkantstäbe zur Unterstützung der Konstruktion, Displayständer mit Erdhalbkugel, bewegliche Sonnenpanele, 2 Sojuz-Transportraumschiffe, 3 Roboterarme; **DM 49,90**.



T-SHIRT „AUGE“

100 Prozent Baumwolle, Größe XL, **DM 29,–**.



PUZZLES

Eruption (1), Kristall (2), Tiefenrausch (3), Format 49,7 × 69,7 cm, je 1000 Teile. Exklusiv von Ravensburger gefertigt; je **DM 39,80**.

JUNIOR WISSEN

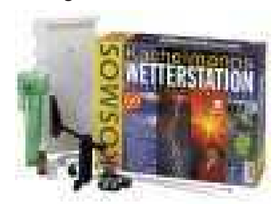


HAMSTERROLLE

Die Hamsterrolle ist ein Nervenkitzel für 2–4 Ringmeister und Rundbauarchitekten ab 6 Jahren. Atemlose Drehmomente und unglaubliche Topspin-Effekte sorgen dafür, dass es ständig rund geht; **DM 74,–**

KACHELMANNS WETTERSTATION

Jörg Kachelmann lässt in seiner Wetterstation nicht nur die Geheimnisse eines Gewitters aufblitzen sondern zeigt auch, wie Hurrikans entstehen oder wie der Körper auf verschiedene Wetterlagen reagiert. Inhalt: 2 Präzisionsthermometer (-30 bis +50 °C), Regenmesser, Windgeschwindigkeitsmesser, Wetterhaus und andere Teile; **DM 198,–**.



INFORMATIONS- UND BESTELLSERVICE →



ASTRONOMIE

Glühende Magnetosphäre

Die Magnetosphäre umhüllt die Erde und schützt sie vor der Teilchenstrahlung des Sonnenwinds – einem Strom von freien Elektronen und Atomkernen, der mit 400 Kilometern pro Sekunde auf sie trifft. Im Einflussbereich des Erdmagnetfelds sammeln sich die geladenen Teilchen zu einem dünnen Plasma. Der Sonnenwind lädt es mit Energie auf und erzeugt magnetische Stürme, die nicht nur spektakuläre Nordlichter hervorrufen, sondern auch Kommunikations- und Energieversorgungssysteme außer Gefecht setzen können. Zur Beobachtung dieses dynamischen Geschehens dient die unlängst gestartete Raumsonde IMAGE. Mit ihrer neuartigen Ultraviolett-Kamera kann sie das kurzwellige Leuchten des Magnetosphärenplasmas verfolgen. Während eines Magnetsturms fotografierte die Sonde außer Nordlichtern auch das ultraviolette Glühen des Plasmas (Bild). Dabei bestätigte sie eine dreißig Jahre alte Modellrechnung, wonach sich bei magnetischen Stürmen ein Plasmaschweif entwickelt, der von der Abendseite der Erde in Richtung Sonne weist. (*Science, Bd. 291, S. 691*)

NASA



So sieht IMAGE das Plasma der Erdmagnetosphäre im UV-Bereich.

SUPRALEITUNG

Sprungtemperatur macht großen Sprung

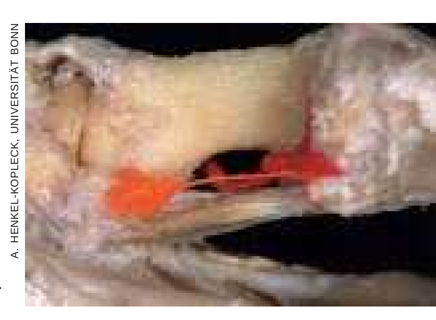
Seit 1973 hielt bei den metallischen Supraleitern Niob-Germanium (Nb_3Ge) den Rekord für die höchste Sprungtemperatur. Die Legierung verliert unterhalb von 23,2 Kelvin (–250° C) jeden elektrischen Widerstand. Jetzt konnte ein Team um Jun Akimitsu an der Aoyama-Gakuin-Universität in Tokio diese Bestmarke fast verdoppeln: Von ihm untersuchte Proben aus Magnesiumdiborid (MgB_2) wurden schon bei 38 Kelvin supraleitend. Damit machte die Sprungtemperatur einen deutlichen Sprung hin zu jenen magischen 77 Kelvin, bei denen billiger flüssiger Stickstoff statt teurem Helium für die Kühlung verwendet werden kann. Zwar leiten die 1986 entdeckten keramischen Supraleiter Strom bei Temperaturen bis zu 132 Kelvin verlustfrei, aber sie sind für viele praktische Anwendungen zu spröde, und ihre Supraleitung bricht schon bei geringen Stromstärken oder schwachen Magnetfeldern zusammen. Deshalb sind Metalle immer noch erste Wahl, wenn es um praktische Anwendungen wie das Erzeugen extrem starker Magnetfelder geht. Der neue Rekordhalter hat einen weiteren Vorteil: Magnesiumborid ist kommerziell erhältlich und nicht allzu teuer. Akimitsu hofft zudem, die Sprungtemperatur durch Einbringen weiterer Elemente noch steigern zu können.

ANATOMIE

Überraschung im Daumen

Die Hand ist ein kompliziertes Körperteil: 26 Knochen, 19 kurze Muskeln und fast hundert Bänder. Nun hat eine Medizinerin am Daumen ein weiteres Band entdeckt. Ihr Fund ist eine Überraschung – galten die anatomischen Rätsel des Menschen doch längst als gelöst. Schon 1994 stieß Hans-Martin Schmidt von der Universität Bonn bei Präparationen des Daumens auf einen Bindegewebsstrang, über den sich die Anatomie-Lehrbücher hartnäckig ausschwiegen. Seitdem hat seine Mitarbeiterin Anette Henkel-Kopleck 81 Hände präpariert, jeweils fein säuberlich Muskeln und Bänder am Daumen freigelegt, gefärbt und fotografiert. In 47 Fällen konnte sie dabei ein bisher unbekanntes Band nachweisen, das wahrscheinlich das Daumengrundgelenk stabilisiert. Zudem fixiert es eine Daumen-Arterie, die Henkel-Kopleck häufig eingeschnürt fand. Eine solche Verengung könnte ein schmerzhaftes Krankheitsbild verursachen. Bisher war die operative Behandlung nicht immer erfolgreich. Dies könnte sich ändern, wenn in den Anatomie-Lehrbüchern die vielleicht letzte Wissenslücke geschlossen wird.

A. HENKEL-KOPLECK, UNIVERSITÄT BONN



Das neu entdeckte Band am Daumen (orange) fixiert eine Arterie (rot) und kann sie dabei einschnüren.

MIKROBIOLOGIE

Unabsichtlich erzeugte Killerviren

Die australischen Forscher wollten eigentlich nur einen schwangerschafts-verhütenden Impfstoff für Mäuse entwickeln. Dazu immunisierten Ron Jackson und Ian Ramshaw die Tiere gegen die Proteine ihrer eigenen Eizellen, indem sie die Gene dafür vom Mäusepocken-Virus übertragen ließen. Um die Produktion von Antikörpern zusätzlich anzuregen, fügten sie in das Erbgut des Virus zudem ein Gen ein, das den Signalstoff Interleukin-4 produziert. Zur ihrer Überraschung brach das Immunsystem der Mäuse daraufhin zusammen. Obwohl die Tiere auf Resistenz gegen das Virus gezüchtet worden waren, erkrankten alle und waren innerhalb von neun Tagen tot. Selbst von den Mäusen, die zusätzlich geimpft worden waren, starb die Hälfte. Weil auf dieselbe Art auch humanpathogene Viren schärfer gemacht werden könnten, publizierten Jackson und Ramshaw die Ergebnisse erst nach Absprache mit dem Verteidigungsministerium ihres Landes. „Wir möchten anderen Forschern klar machen, dass sie vorsichtig sein sollen – denn es ist nicht allzu schwierig, bedrohliche Organismen zu erschaffen“, erklärte Jackson. (*Journal of Virology, Bd. 75, S. 1205*)

CSIRO



Impfstoff gegen Mäuseplage brachte Tod statt Unfruchtbarkeit.

GEOLOGIE

„Verlorene Stadt“ am Meeresgrund

Bei der Untersuchung eines ungewöhnlich hohen submarinen Berges am Mittelatlantischen Rücken bei 30 Grad Nord entdeckten amerikanische Forscher zufällig ein Feld mit den größten bisher bekannten hydrothermalen Vulkanschloten. Steilwandig und mit vielen zinnenartigen Spitzen ragen sie bis zu 55 Meter in die Höhe. Aktive Schlote erscheinen weiß, erloschene beige. 70° C heißes Wasser fängt sich unter langen Reihen zarter Simse (Bild). Wegen dieser imposanten Erscheinung tauften die Entdecker, die mit dem Forschungsschiff *Atlantis* und dem Tauchboot *Alvin* unterwegs waren, das Feld „The Lost City“, die verlorene Stadt. Nicht nur auf Grund seiner ungewöhnlichen Größe ist es einmalig, sondern auch, weil es auf einer Ozeankruste ruht, die immerhin schon eine Million Jahre alt und damit ziemlich ausgelaugt ist. Dies erklärt wohl auch, warum mit dem Wasser eher ungewohnte Stoffe nach oben kommen: Die Schlote bestehen nicht wie bei den meisten anderen heißen submarinen Quellen aus Eisen- und Schwefelverbindungen, sondern aus Carbonat- und Silicatgestein. Ihre abweichende Zusammensetzung wiederum ist vermutlich der Grund dafür, dass sie nicht – wie sonst üblich – dicht von exotischen Tieren besiedelt sind. „Diese große Entdeckung erinnert uns daran, dass der Ozean noch viele Geheimnisse birgt“, sagte Margaret Leinen von der amerikanischen National Science Foundation, mit deren Unterstützung die Expedition stattfand.



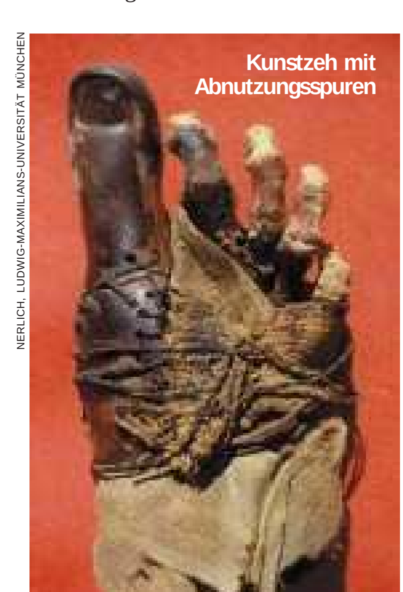
Seitliche Öffnung an der Flanke eines fast fünfzig Meter hohen Schlotes

NATIONAL SCIENCE FOUNDATION

ÄGYPTOLOGIE

Erste benutzte Prothese

Den erstaunlich hohen Stand der Medizintechnik im alten Ägypten belegt die jüngst in der Nekropole von Theben geborgene Mumie einer Frau, die vor rund 3000 Jahren im Alter von etwa 55 Jahren starb. Sie trägt eine perfekt geformte Prothese des großen Zehs aus Holz. Selbst der Nagel ist naturgetreu nachgebildet. Und mit zwei kleinen Holzplatten, Lederriemen und Schnüren wurde der Kunstzeh belastbar am rechten Fuß befestigt. Zwar sind Prothesen an ägyptischen Mumien nichts Neues. Aber in den bisher bekannten Fällen wurden sie Verstorbenen hinzugefügt, um sie für das Leben im Jenseits auszustatten. Die Ägypterin mit dem Kunstzeh litt dagegen an Arteriosklerose. Deshalb unterzog sie sich noch im Diesseits einem chirurgischen Eingriff und überlebte ihn offenbar auch. Jedenfalls war der Amputationsstumpf unter der Prothese gut verheilt. Und der Kunstzeh trägt eindeutige Gebrauchsspuren. Forscher um den Pathologen Andreas G. Nerlich von der Universität München halten ihn deshalb für die älteste bekannte Gliedmaßenprothese. Diesen Rang könnte ihm nur noch ein Zehenersatz im Britischen Museum streitig machen, der ebenfalls Verschleißerscheinungen aufweist, aber nicht datiert ist. (*Lancet, Bd. 356, S. 2176*)



Kunstzeh mit Abnutzungsspuren

NERLICH, LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

GENETIK

Affe mit Leuchtstoff-Gen

Transgene Bakterien, Pflanzen und Mäuse gehören inzwischen zum Labor-Alltag. Jetzt haben Forscher um Gerald Schatten am Oregon Regional Primate Center in Portland erstmals auch in die Keimbahn eines Primaten eingegriffen. Mit Erfolg: Rhesusaffe ANDi trägt in seinem Genom ein Quallen-Gen mit dem Code für ein grün fluoreszierendes Protein. Sein Name ist die umgekehrte Buchstabenfolge von iDNA, die Abkürzung für inserted – also eingefügte – DNA. Zum Einschleusen des artfremden Erbguts nutzten die amerikanischen Forscher Retroviren, denen sie das Quallen-Gen eingebaut hatten. Doch ganz so einfach ist die Modifikation des Erbguts nicht: Von ursprünglich 224 manipulierten und im Reagenzglas befruchteten Eizellen konnten vierzig Embryonen verpflanzt werden, doch nur fünf Affen-Leihmütter wurden schwanger. Von ANDis Geschwistern kamen zwei lebend, aber nicht leuchtend und zwei leuchtend, aber tot zur Welt. Nur ANDi überlebte und trägt das neue Gen, doch er leuchtet bisher nicht. Offenbar befindet sich das Gen an einer Stelle im Erbgut, an der es momentan nicht abgelesen wird. Das ändert sich vielleicht noch, wenn das Tier älter wird. Die Wissenschaftler wollen nun sinnvollere Gene bei Primaten einbauen. „Wir hoffen, in der Forschung die Kluft zwischen transgenen Mäusen und Menschen überwinden zu können“, erklärte Schatten, der letztes Jahr schon den ersten Affen durch Teilung eines Embryos geklont hatte. (*Science, Vol. 291, S. 309*)

OREGON REGIONAL PRIMATE CENTER

ANDi, der erste genveränderte Primat



Der explosive neue

Neue Supernova-Daten legen den Schluss nahe, dass das Universum seit seiner Entstehung im Urknall immer schneller expandiert. Jetzt sind die Theoretiker am Zug: An ihnen ist es, die Phänomene zu erklären. Den Stand der Debatte wollen wir in diesem und im nächsten Heft präsentieren.

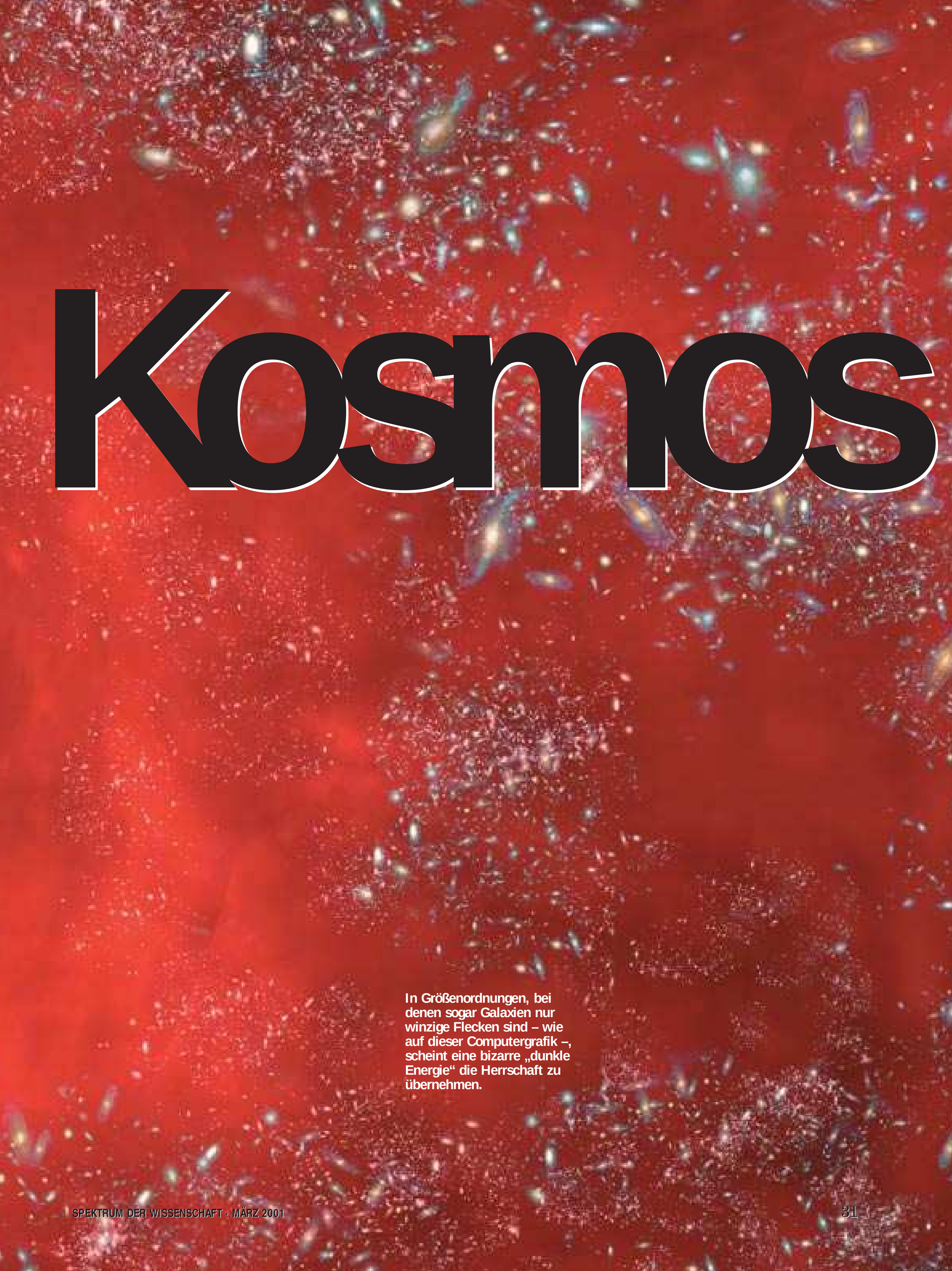
Die Astrophysiker Jeremiah Ostriker und Paul Steinhardt plädieren für eine geheimnisvolle Energie, die das All seit Anbeginn erfüllt. Diese hypothetische „Quintessenz“ sorgt für eine abstoßende Kraft, die allmählich die Gravitationsanziehung überwindet und dem beschleunigt expandierenden All eine unendliche Zukunft beschert.

Skeptischer äußert sich James Peebles, ein Gründervater der modernen Kosmologie: Für eine abschließende Bewertung des Modells vom explosiven Universum ist es ihm noch zu früh.

Ganz anders der Astrophysiker João Magueijo. Ihm gehen selbst die gewagtesten Spekulationen der Quintessenz-Verfechter noch nicht weit genug. Warum, so fragt er, muss die Lichtgeschwindigkeit schon zu Beginn denselben Wert gehabt haben wie heute? Man wird ja noch fragen dürfen ...

Im zweiten Teil wird es um neue Daten gehen, die der Satellit MAP (*Microwave Anisotropy Probe*) noch in diesem Jahr liefern soll. Er könnte Echos des Urknalls entdecken – die Nachwirkung von Gravitationswellen, die das junge Universum durchquert und die Keime zu späteren Galaxien hervorgebracht haben.

DON DIXON



Kosmos

In Größenordnungen, bei denen sogar Galaxien nur winzige Flecken sind – wie auf dieser Computergrafik –, scheint eine bizarre „dunkle Energie“ die Herrschaft zu übernehmen.

Die Quintessenz des Universums

Das All wird von einem unsichtbaren Energiefeld beherrscht, das die kosmische Expansion beschleunigt. Diese „dunkle Energie“ könnte von einem exotischen Quantenfeld herrühren, das im Laufe der Zeit seinen Wert geändert hat und dem All eine ungewisse Zukunft beschert.

Von Jeremiah P. Ostriker und Paul J. Steinhardt

Ist alles geklärt? Haben wir den Kosmos verstanden, abgesehen von ein paar kleinen Details? Noch vor einigen Jahren sah es fast so aus. Nach einem Jahrhundert hitziger Debatten hatten die Wissenschaftler einen breiten Konsens über die grundsätzliche Geschichte unseres Universums erreicht. Demnach begann das All mit Gas und Strahlung von unvorstellbar hoher Temperatur und Dichte; seit 15 Milliarden Jahren dehnt es sich aus und kühlt dabei ab. Galaxien und andere komplexe Strukturen sind aus mikroskopisch kleinen Keimen – Quantenfluktuationen – entstanden, die während einer kurzen Phase der „Inflation“ auf kosmische Größe aufgebläht wurden.

Wir wissen auch, dass nur ein kleiner Bruchteil der Materie aus den üblichen chemischen Elementen zusammengesetzt ist, die wir aus unserem täglichen Leben kennen. Der Großteil besteht aus so genannter dunkler Materie – hauptsächlich exotischen Elementarteilchen, die mit Licht keine Wechselwirkung haben. Zwar blieben viele Rätsel übrig, aber im Großen und Ganzen schien dieses Bild zu stimmen.

Das dachten wir jedenfalls. Nun stellt sich heraus, dass wir den größten Teil der Geschichte übersehen haben. In den letzten fünf Jahren wurden die Kosmologen durch neue Beobachtungen überzeugt, dass die chemischen Elemente und die dunkle Materie zusammen weniger als die Hälfte des Universums ausmachen. Das meiste ist eine allgegenwärtige „dunkle Energie“ mit einer höchst seltsamen Eigenschaft: Ihre Gravitation wirkt nicht anziehend, sondern abstoßend. Während die Schwerkraft die chemischen Elemente und die dunkle Materie zu Sternen und Galaxien zusammenzieht, verteilt sie die dunkle Energie durch Abstoßung zu einem fast gleichmäßigen Nebel, der den Weltraum erfüllt. Das Universum ist ein Schlachtfeld zweier Kräfte, und die abstoßende Gravitation gewinnt die Oberhand. Sie überwältigt allmählich die anziehende Kraft der gewöhnlichen Materie und bewirkt, dass die Expansion des Universums sich immer mehr beschleunigt. Vielleicht führt dies zu einer erneuten ungehemmten Inflationsphase und zu einer völlig anderen Zukunft des Universums, als die meisten Kosmologen noch vor einem Jahrzehnt dachten.

Bis vor kurzem haben die Kosmologen sich bloß darauf konzentriert, die Existenz der dunklen Energie nachzuweisen. Nachdem sie das mit überzeugenden Argumenten getan haben, wenden sie ihre Aufmerksamkeit nun einem tieferen Problem zu: Wo kommt sie her? Die nächstliegende Möglichkeit ist, dass



Unmittelbar nach dem Urknall – hier ein Simulationsmodell – wurde das Universum von Gravitationswellen durchgeschüttelt, deren spätes Echo die Forscher heute in winzigen Unterschieden der kosmischen Hintergrundstrahlung nachzuweisen hoffen. Das spätere Schicksal des Alls wird offenbar von einer universellen Abstoßungskraft geprägt.

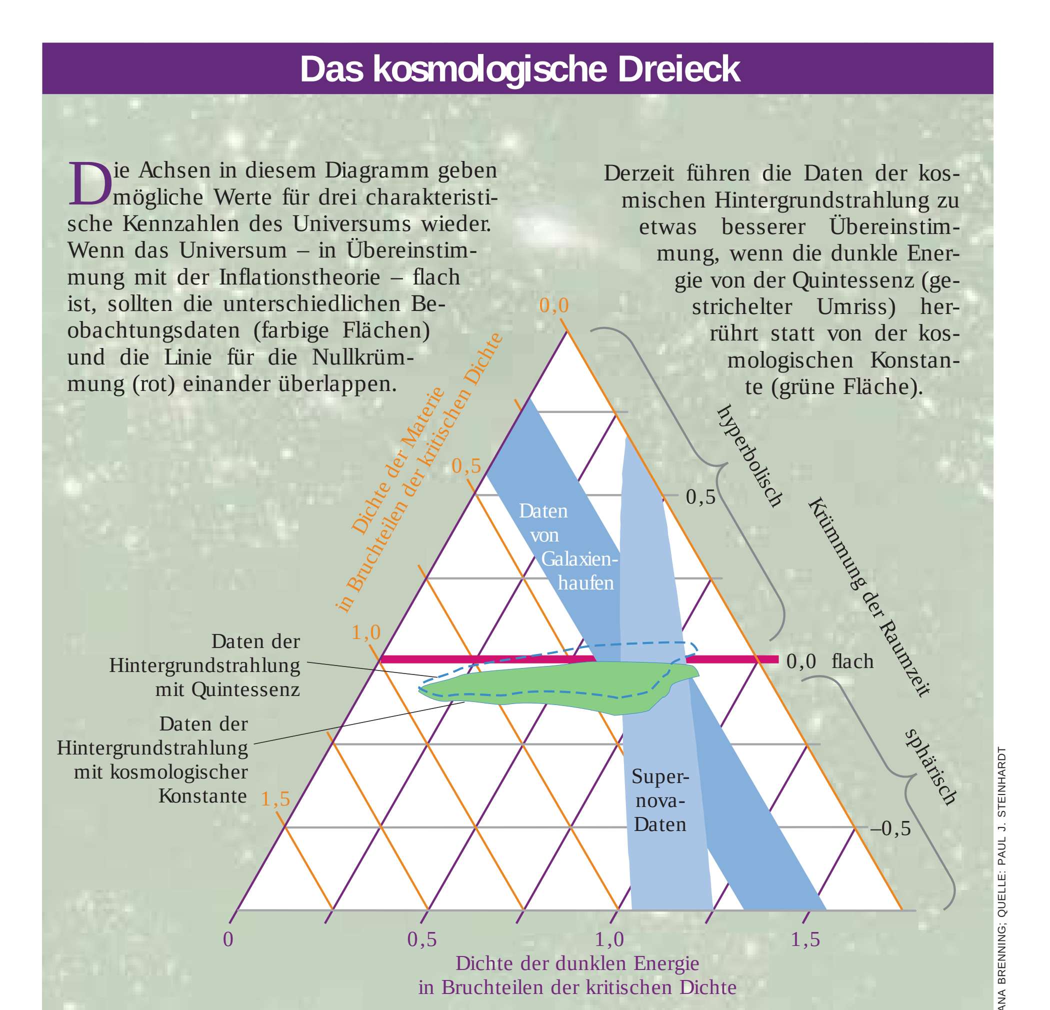
SLIM FILMS

die dunkle Energie zur Struktur des Raumes gehört. Selbst ein völlig leeres Raumvolumen – ohne jegliche Materie und Strahlung – würde diese Energie enthalten. Das ist eine alte Idee, die noch von Albert Einstein und seinem Versuch aus dem Jahre 1917 stammt, ein statisches Modell des Universums zu konstruieren.

Wie sein Vorgänger Newton und viele andere führende Wissenschaftler glaubte auch Einstein, das Universum sei unveränderlich; weder ziehe es sich zusammen noch dehne es sich aus. Um seiner Allgemeinen Relativitätstheorie diesen Stillstand abzugewinnen, musste er eine Vakuumenergie einführen oder, in seiner Terminologie, eine kosmologische Konstante. Er setzte den Wert der Konstante so fest, dass ihre gravitative Abstoßung die Gravitationsanziehung der Materie genau kompensiert.

Als die Astronomen bald darauf feststellten, dass das Universum expandiert, bedauerte Einstein seinen Kunstgriff und bezeichnete ihn als den größten Schnitzer seines Lebens. Aber vielleicht war dieses Urteil voreilig. Falls die kosmologische Konstante einen etwas größeren Wert hat als von Einstein vorgeschlagen, überwiegt ihre Abstoßung die Anziehung der Materie, und die kosmische Expansion wird beschleunigt.

Das kosmologische Dreieck



Doch manche Kosmologen verfolgen nun eine andere Idee namens Quintessenz. Der Begriff stammt aus der Naturphilosophie der Antike und bezeichnet auf lateinisch eine „fünfte Substanz“, die zusätzlich zu den vier Elementen der alten Griechen – Erde, Wasser Luft und Feuer – das Universum erfüllen und verhindern soll, dass der Mond und die Planeten zum Mittelpunkt der Himmelsphäre fallen. Vor drei Jahren wählten Robert R. Caldwell, Rahul Dave und einer von uns (Steinhardt), damals alle an der Universität von Pennsylvania, diesen Begriff als Namen für ein Quantenkraftfeld, das ein wenig einem elektrischen oder magnetischen Feld ähnelt und gravitativ abstoßend wirkt.

Was die Quintessenz für Kosmologen so attraktiv macht, ist ihre Dynamik. Das größte Problem für jede Theorie der dunklen Energie ist, deren exakten Betrag zu erklären – einerseits nicht so viel, dass die Bildung von Sternen und Galaxien im frühen Universum beeinträchtigt würde, aber andererseits gerade so viel, dass die Wirkung gegenwärtig eine Rolle spielt. Vakuumenergie ist völlig träge; sie behält für alle Zeit dieselbe Dichte. Um den heutigen Betrag der dunklen Energie zu erklären, müsste darum der Wert der kosmologischen Konstante schon bei der Entstehung des Universums exakt auf den passenden Wert abgestimmt worden sein – und so etwas sieht verdächtig nach Pfusch aus. Hingegen tritt die Quintessenz mit Materie in Wechselwirkung und entwickelt sich im Laufe der Zeit; dadurch könnte sie auf natürliche Weise den heute beobachteten Wert erreicht haben.

Das fünfte Element

Die Entscheidung zwischen diesen beiden Möglichkeiten ist für die Physik sehr wichtig. Bisher sind die Teilchenphysiker auf Hochenergiebeschleuniger angewiesen, um neue Formen von Energie und Materie zu entdecken. Nun offenbart uns der Kosmos eine völlig neuartige Energie – viel zu dünn verteilt und viel zu schwach wechselwirkend für irdische Teilchenbeschleuniger. Ob diese Energie träge oder dynamisch ist, könnte für die Entwicklung einer fundamentalen Theorie der Natur entscheidend sein. Die Teilchenphysiker entdecken allmählich, dass astronomische Daten für sie genau so wichtig sind wie Beschleunigerexperimente.

Seit fast zehn Jahren werden immer mehr Argumente für die dunkle Energie gesammelt. Der erste Schritt war eine sorgfältige Abschätzung der gesamten Materie in Galaxien und Galaxienhaufen auf Grund von Messungen im optischen, Röntgen- und Radiobereich. Das Ergebnis war eindeutig: Die Gesamtmasse an chemischen Elementen und dunkler Materie ergibt zusammen nur etwa ein Drittel des von den meisten Theoretikern erwarteten Betrags – der so genannten kritischen Dichte.

Viele Kosmologen schlossen daraus, die Theoretiker hätten Unrecht. In diesem Fall würden wir in einem ständig expandierenden Universum leben, in dem der Raum hyperbolisch gekrümmt ist, ähnlich wie der Trichter einer Trom- ▶



pete (siehe „Was vor dem Urknall geschah“ von Martin A. Bucher und David N. Spergel, Spektrum der Wissenschaft 3/1999, S. 54). Doch diese Erklärung wurde durch das Vermessen warmer und kalter Stellen in der kosmischen Hintergrundstrahlung widerlegt: Wie deren Verteilung zeigt, ist der Raum flach, und die Gesamtenergiedichte entspricht der kritischen Dichte. Angesichts beider Beobachtungen drängt sich die Notwendigkeit einer zusätzlichen Energiekomponente auf, die für die fehlenden zwei Drittel der Energiedichte aufkommt.

Woraus die neue Komponente auch immer besteht, sie muss dunkel sein – das heißt Licht weder absorbieren noch emittieren –, sonst wäre sie schon längst bemerkt worden. Insofern ähnelt sie dunkler Materie. Aber die neue Komponente – die dunkle Energie – unterscheidet sich von dunkler Materie in einem wichtigen Punkt: Ihre Gravitation muss abstoßend sein. Andernfalls würde sie in Galaxien und Haufen hineingezogen, wo sie die Bewegung der sichtbaren Materie beeinflussen müsste; doch ein solcher Einfluss ist nicht zu beobachten. Außerdem löst die Gravitationsabstoßung das „Altersproblem“, das den Kosmologen in den neunziger Jahren zu schaffen machte.

Wenn man die derzeitigen Messungen der Expansionsrate betrachtet und annimmt, dass die Expansion sich mit der Zeit verlangsamt, ergibt sich ein Alter des Universums von weniger als zwölf Milliarden Jahren.

Doch einige Sterne in unserer Milchstraße sind offenbar 15 Milliarden Jahre alt. Indem die Abstoßung die Expansionsrate des Universums beschleunigt, bringt sie das Alter des Kosmos in Einklang mit dem beobachteten Alter der Himmelskörper (siehe „Neuer Auftrieb für ein beschleunigtes Universum“ von Lawrence M. Krauss, Spektrum der Wissenschaft 3/1999, S. 46).

Von der Implosion zur Explosion

Der Haken an diesem Argument war freilich, dass die Gravitationsabstoßung die Expansion beschleunigen müsste – und so etwas wurde lange Zeit nicht beobachtet. Doch 1998 passte endlich alles zusammen: Zwei unabhängige Forschergruppen konnten bei Messungen an weit entfernten Supernovae eine Änderung der Expansionsrate nachweisen. Beide Gruppen schlossen, dass sich die Expansion des Universums beschleunigt, und zwar genau um den vorhergesagten Betrag (siehe „Die Vermessung der Raumzeit mit Supernovae“ von Craig J. Hogan et al., Spektrum der Wissenschaft 3/1999, S. 40).

All diese Beobachtungen lassen sich auf drei Zahlen reduzieren: die mittlere Dichte der Materie (sowohl der normalen und der dunklen), die mittlere Dichte der dunklen Energie und die Krümmung des Raumes. Nach Einsteins Gleichungen ergeben diese drei Zahlen zusammen die kritische Dichte. Die verschiedenen möglichen Kombinationen lassen sich prägnant in einem Dreiecksdiagramm darstellen (Abbildung auf Seite 33). Die drei unterschiedlichen Datenmengen – Massenabschätzung, kosmische Hintergrundstrahlung und Supernovae – ergeben Streifen innerhalb des Dreiecks. Tatsächlich überlappen sich die drei Streifen an derselben Stelle; das liefert ein überzeugendes Argument für die dunkle Energie.

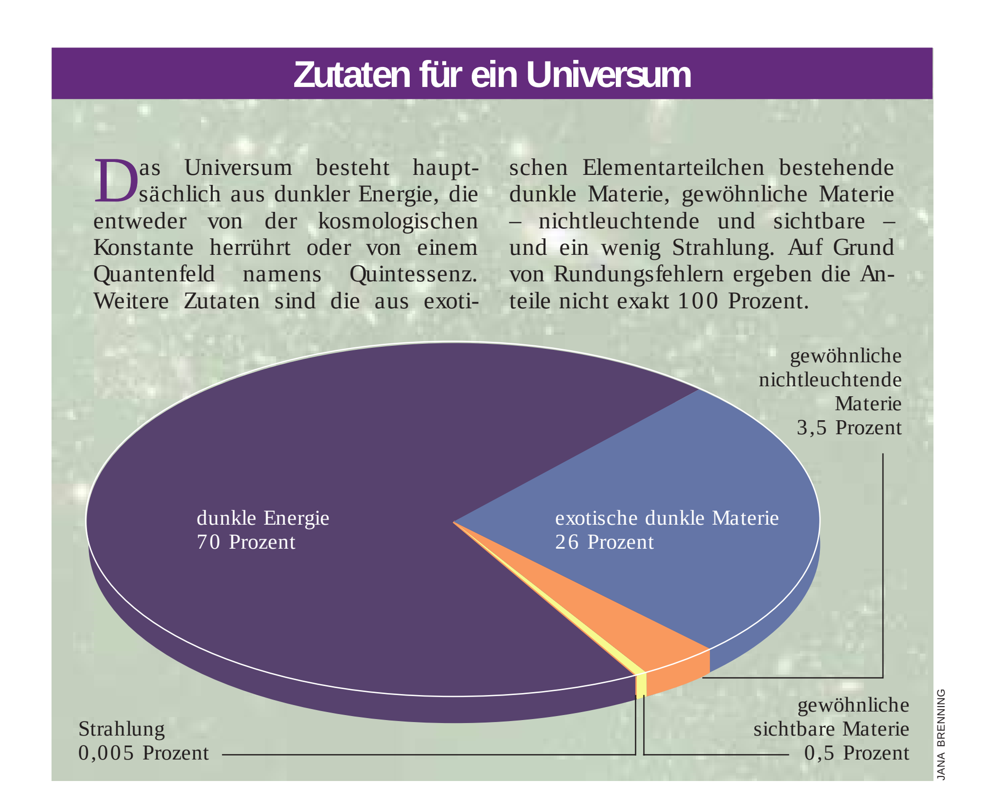
Da wir aus unserer täglichen Erfahrung nur gewöhnliche Materie kennen, deren Gravitation anziehend wirkt, können wir uns kaum vorstellen, wie dunkle Energie gravitativ abstoßend zu wirken vermag. Entscheidend ist, dass ihr Druck negativ ist. In Newtons Gravitationsgesetz spielt der Druck keine Rolle; die Stärke der Schwerkraft hängt nur von der Masse ab. In Einsteins Gravitationsgesetz jedoch hängt sie nicht nur von der Masse ab, sondern auch von anderen Energieformen sowie vom Druck. Auf diese Weise wirkt der Druck zweifach: direkt durch die Wirkung des Drucks auf das umgebende Material sowie indirekt durch die vom Druck erzeugte Gravitation.

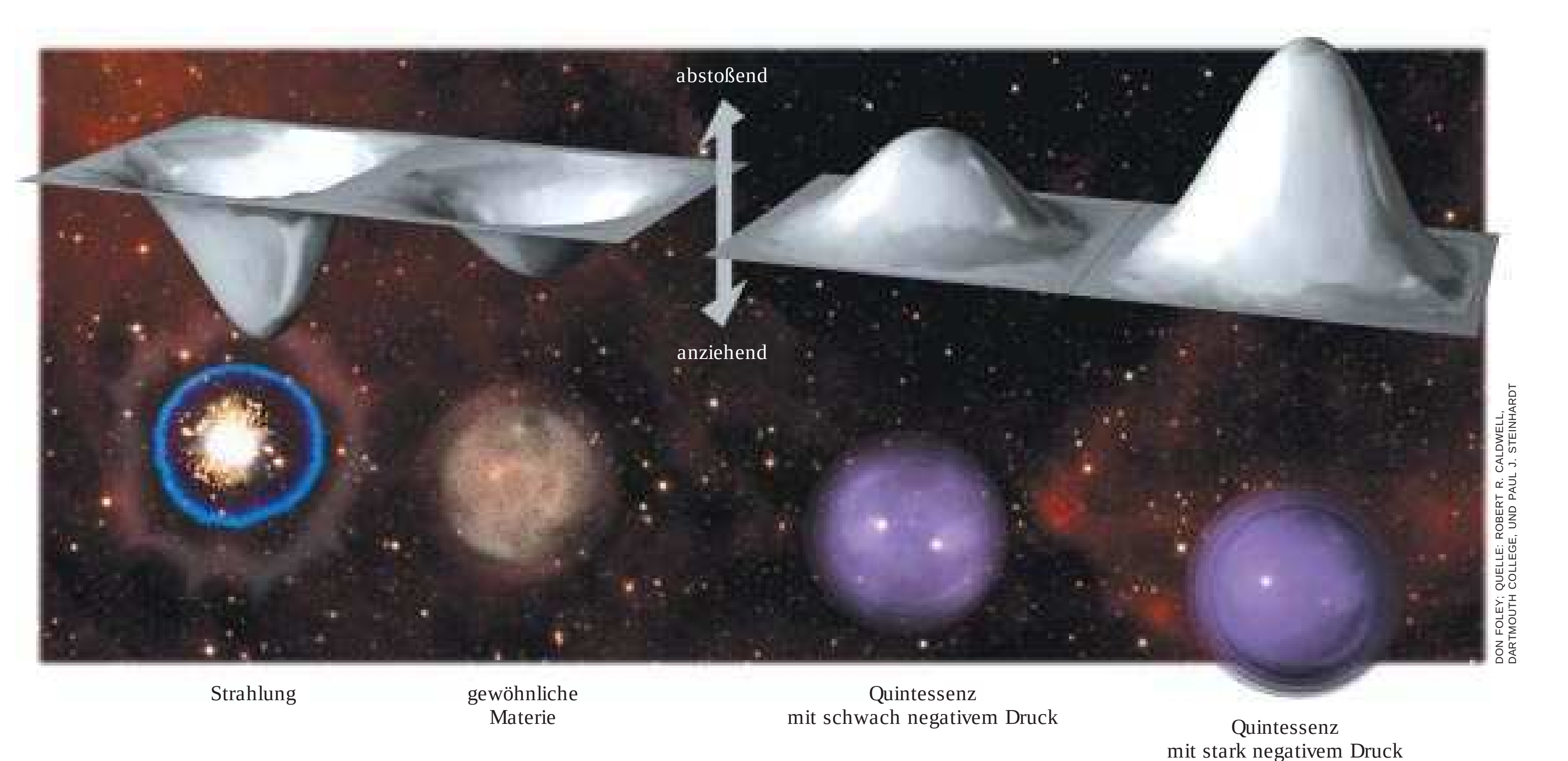
Das Vorzeichen der Gravitationskraft wird durch eine algebraische Kombination aus der Gesamtenergiedichte und dem Dreifachen des Drucks bestimmt. Wenn der Druck positiv ist – wie bei Strahlung, gewöhnlicher Materie und dunkler Materie –, dann ist auch die Kombination positiv und die Gravitation anziehend. Ist der Druck genügend negativ, dann wird die resultierende Größe negativ und die Gravitation abstoßend. Genauer gesagt betrachten die Kosmologen die so genannte Zustandsgleichung, die das Verhältnis w von Druck zu Energiedichte ausdrückt. Für ein normales Gas ist w positiv und proportional zur Temperatur. Aber in bestimmten Systemen kann w negativ sein. Wenn es kleiner als $-1/3$ wird, wirkt die Gravitation abstoßend.

Die Vakuumenergie – sofern ihre Dichte positiv ist – erfüllt diese Bedingung. Das folgt aus dem Prinzip der Energieerhaltung, demzufolge Energie nicht vernichtet werden kann. Mathematisch lässt sich dieses Gesetz so umformulieren, dass die Änderungsrate der Energiedichte proportional zu $w+1$ ist. Für die Vakuumenergie – deren Dichte sich per Definition nie ändert – muss diese Summe stets null sein. Mit anderen Worten, w muss genau gleich -1 und somit der Druck negativ sein.

Zutaten für ein Universum

Das Universum besteht hauptsächlich aus dunkler Energie, die entweder von der kosmologischen Konstante herrührt oder von einem Quantenfeld namens Quintessenz. Weitere Zutaten sind die aus exotischen Elementarteilchen bestehende dunkle Materie, gewöhnliche Materie – nichtleuchtende und sichtbare – und ein wenig Strahlung. Auf Grund von Rundungsfehlern ergeben die Anteile nicht exakt 100 Prozent.





Ob ein Stück Materie oder Energie gravitativ anziehend oder abstoßend wirkt, hängt von seinem Druck ab. Wenn der Druck null oder positiv ist – das ist für Strahlung oder gewöhnliche Materie der Fall –, wirkt die Gravitation anziehend: Das Potenzial des Schwerefelds bildet eine Senke. Strahlung hat größeren Druck, darum ist ihre Gravitation stärker anziehend und der Potenzialtopf tiefer. Bei der Quintessenz ist der Druck negativ und die Gravitation abstoßend: Aus den Senken werden Hügel.

Was aber bedeutet negativer Druck? Die meisten Gase üben positiven Druck aus: Die kinetische Energie der Atome und die Strahlung drücken auswärts auf den Behälter. Man beachte: Die direkte Wirkung des positiven Drucks – nach außen zu drücken – steht im Gegensatz zu seiner Gravitationswirkung – dem Zug nach innen. Aber man kann sich eine Wechselwirkung unter den Atomen vorstellen, welche die kinetische Energie überwiegt und eine Implosion des Gases verursacht. Das implosive Gas hat negativen Druck. Ein mit diesem Gas gefüllter Ballon würde kollabieren, denn der Außendruck – der null oder positiv ist – würde den negativen Innendruck überwiegen. Seltsamerweise kann nun der direkte Effekt des negativen Drucks, die Implosion, im Gegensatz zu seinem abstoßenden Gravitationseffekt stehen.

Abstoßende Schwerkraft

Bei einem Ballon fällt die Wirkung der Schwerkraft kaum ins Gewicht. Doch angenommen, der gesamte Raum ist von dem implosiven Gas erfüllt. Dann gibt es keine äußere Grenzfläche mehr und keinen Außendruck. Das Gas erzeugt noch immer negativen Druck, aber es hat nichts, wogegen es drücken könnte; also übt es keine direkte Wirkung aus. Nur die Gravitationswirkung bleibt übrig – und die ist abstoßend. Die Abstoßung dehnt den Raum aus, vergrößert sein Volumen und demzufolge – auf Kosten des Gravitationsfeldes – den Betrag der Vakuumenergie. Die Tendenz zur Ausdehnung wirkt deshalb selbstverstärkend. Das Universum dehnt sich mit zunehmender Geschwindigkeit aus.

Diese Vorstellung mag seltsam erscheinen, und sogar Einstein sträubte sich dagegen. Er betrachtete das statische Universum, den ursprünglichen Beweggrund für die Einführung der Vakuumenergie, alsbald als unglückliche Fehlkonzeption. Aber nachdem die kosmologische Konstante einmal eingeführt war, verschwand sie nicht so leicht von der Bildfläche. Die Theoretiker erkannten bald, dass Quantenfelder eine bestimmte Menge an Vakuumenergie besitzen; dies ist eine Auswirkung der Quantenfluktuationen, die kurzzeitig Paare virtueller Teilchen aus dem Nichts entstehen lassen. Eine Abschätzung der von allen bekannten Feldern insgesamt erzeugten Vakuumenergie ergibt einen riesigen Betrag: 120 Größenordnungen mehr als die Energiedichte der gesamten Materie. Dies bedeutet, obwohl man es sich kaum vorzustellen vermag, dass die flüchtigen virtuellen Teilchen eine positive, konstante Energiedichte liefern – und das würde negativen Druck bedeuten. Wenn diese Schätzung zuträfe, würde eine ungeheure Beschleunigung Atome, Sterne und Galaxien auseinander reißen. Offensichtlich ist diese Schätzung falsch. Eines der Hauptziele der Theorien der Quantengravitation ist herauszufinden, warum.

Einem Vorschlag zufolge bewirkt eine bisher unentdeckte Symmetrie in den physikalischen Grundgesetzen, dass die großen Effekte einander exakt aufheben und die Vakuumenergie auf null bringen. Zum Beispiel liefern Quantenfluktuationen von virtuellen Teilchen mit halbzahligem Spin – wie Quarks und Elektronen – positive Energie, während Teilchen mit ganzzahligem Spin, etwa Photonen, negative Energie beitragen. In der Standardtheorie hebt sich beides nicht exakt auf und lässt eine unakzeptabel hohe Energiedichte übrig. Doch die Physiker erproben derzeit Theorien mit so genannter Supersymmetrie; diese Beziehung zwischen den beiden Teilchensorten kann zu einer exakten Aufhebung führen. Der große Nachteil dabei ist jedoch, dass die Supersymmetrie nur bei sehr hohen Energien gilt. Theoretiker suchen nun die perfekte Aufhebung auch bei geringeren Energien zu erhalten.

Ein anderer Gedanke besagt, dass die Vakuumenergie doch nicht exakt aufgehoben wird. Vielleicht hebt ein etwas unvollkommener Ausgleichsmechanismus die kosmologische Konstante nur auf 120 Dezimalstellen genau auf. Dann könnte die Vakuumenergie die fehlenden zwei Drittel des Universums bilden. Doch das erscheint bizarr. Welcher Mechanismus könnte überhaupt mit solcher Genauig- ▶



keit funktionieren? Obgleich die dunkle Energie einer riesigen Gesamtmasse entspricht, ist sie so fein verteilt, dass ihre Energiedichte kaum vier Elektronenvolt pro Kubikmillimeter beträgt – für einen Teilchenphysiker unvorstellbar wenig. Die schwächste bekannte Naturkraft hat eine 10^{50}-mal größere Energiedichte.

Wird die Vakuumenergie in die Vergangenheit zurück extrapoliert, so erscheint sie noch paradoxer. Heutzutage haben Materie und dunkle Energie vergleichbare mittlere Dichten. Aber als sie vor Milliarden von Jahren entstanden, hatte unser Universum die Größe einer Grapefruit, und die Materie war 100 Größenordnungen dichter. Doch die kosmologische Konstante hätte denselben Wert gehabt wie heute. Mit anderen Worten, pro 10^{100} Teile Materie hätten physikalische Prozesse ein Teil Vakuumenergie erzeugt – ein Grad an Genauigkeit, der im mathematischen Idealfall denkbar wäre, aber in der realen Welt absurd anmutet.

Diese Notwendigkeit einer fast übernatürlichen Feinabstimmung ist der prinzipielle Grund dafür, Alternativen zur kosmologischen Konstante zu betrachten. Glücklicherweise lässt sich nicht nur mit Vakuumenergie negativer Druck erzeugen. Eine andere Möglichkeit ist die bereits erwähnte Quintessenz, eine – im Gegensatz zur Vakuumenergie – räumlich und zeitlich variable Energiequelle. Für sie hat *w* keinen festen Wert; er muss nur unter –1/3 liegen, damit die Gravitation abstoßend wird.

Quanten-Quintessenz

Die Quintessenz kann viele Formen annehmen. Die einfachsten Modelle gehen von einem Quantenfeld aus, dessen Energie so langsam variiert, dass es auf den ersten Blick wie eine konstante Vakuumenergie aussieht. Diese Idee wurde aus der inflationären Kosmologie entliehen, in der ein so genanntes Inflaton-Feld die Expansion im sehr frühen Universum über denselben Mechanismus antreibt. Der Hauptunterschied ist, dass die Quintessenz viel schwächer als die Inflation ist. Diese Hypothese haben zum ersten Mal vor einem Jahrzehnt Christoph Wetterich von der Universität Heidelberg und Bharat Ratra, der jetzt an der Kansas State University tätig ist, sowie P. James E. Peebles von der Princeton University untersucht.

In der Quantentheorie lassen sich physikalische Prozesse entweder durch Felder oder Teilchen beschreiben. Aber weil die Quintessenz so winzige Energiedichte hat und nur so schwach variiert, wäre ein Quintessenz-Teilchen einerseits unvorstellbar massearm, andererseits so riesig wie ein Galaxien-Superhaufen. Darum eignet sich die Beschreibung als Feld viel besser. Begrifflich ist ein Feld eine kontinuierliche Energieverteilung, die jedem Raumpunkt einen Zahlenwert zuordnet, die so genannte Feldstärke. Die im Feld enthaltene Energie hat eine kinetische Komponente, die von der zeitlichen Änderung der Feldstärke abhängt, und eine potenzielle, nur vom Wert der Feldstärke abhängende Komponente. Wenn das Feld sich ändert, verschiebt sich das Verhältnis von kinetischer und potenzieller Energie.

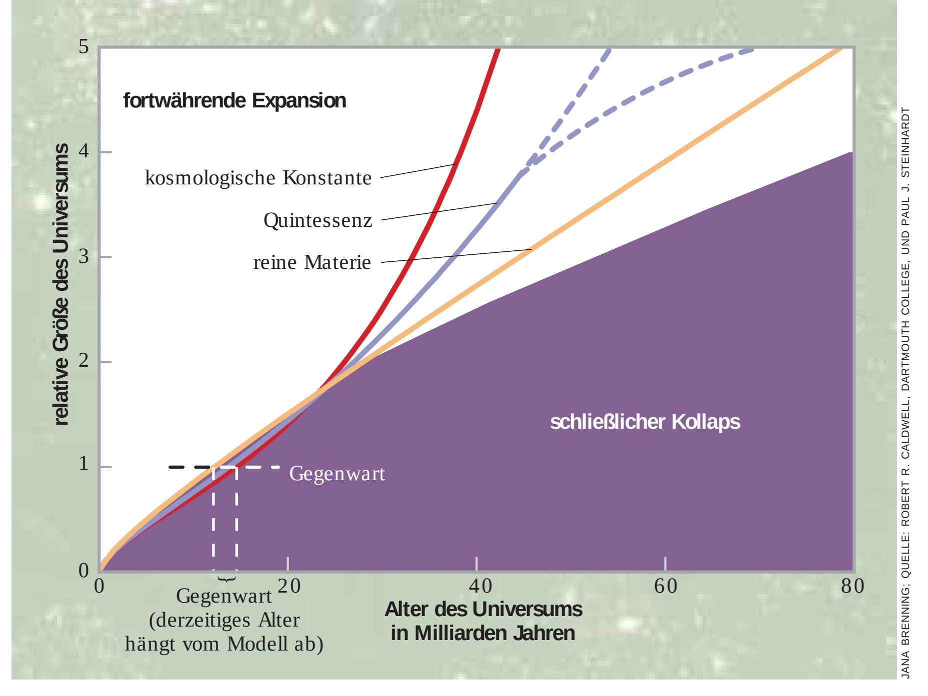
Im Falle der Vakuumenergie ist der negative Druck wie erwähnt das direkte Resultat der Energieerhaltung; sie besagt, dass jede Änderung der Energiedichte proportional zur Summe von – positiver – Energiedichte und Druck ist. Für die Vakuumenergie beträgt die Änderung null, also muss der Druck einen negativen Wert haben. Für die Quintessenz ist die Änderung so langsam, dass der Druck ebenfalls negativ sein muss, wenn auch etwas weniger. Diese Bedingung bedeutet, dass mehr potenzielle als kinetische Energie vorhanden ist.

Weil der Druck der Quintessenz etwas weniger negativ ist, beschleunigt sie die Expansion des Universums nicht so stark wie die Vakuumenergie. Dieser Unterschied ist prinzipiell beobachtbar. Zwar lässt sich die Quintessenz etwas besser mit den heute verfügbaren Daten vereinen, aber vorläufig ist der Unterschied statistisch nicht signifikant. Ein weiterer Unterschied gegenüber der Vakuumenergie ist, dass das Quintessenz-Feld alle möglichen komplizierten Entwicklungen durchmachen könnte. Der Wert von *w* kann einmal positiv, dann negativ und danach wieder positiv sein. Er kann auch von Ort zu Ort variieren. Diese vermutlich sehr geringe Ungleichmäßigkeit ist vielleicht in der kosmischen Hintergrundstrahlung nachzuweisen.

Außerdem kann die Quintessenz gestört werden: Wellen können sich durch sie hindurch fortpflanzen wie Schallwellen durch Luft. Im Fachjargon sagt man, die Quintessenz sei „weich“. Hingegen ist Einsteins kosmologische Konstante fest: Sie lässt sich nicht verändern. Das wirft eine interessante Frage auf. Jede

Ungewisse Zukunft

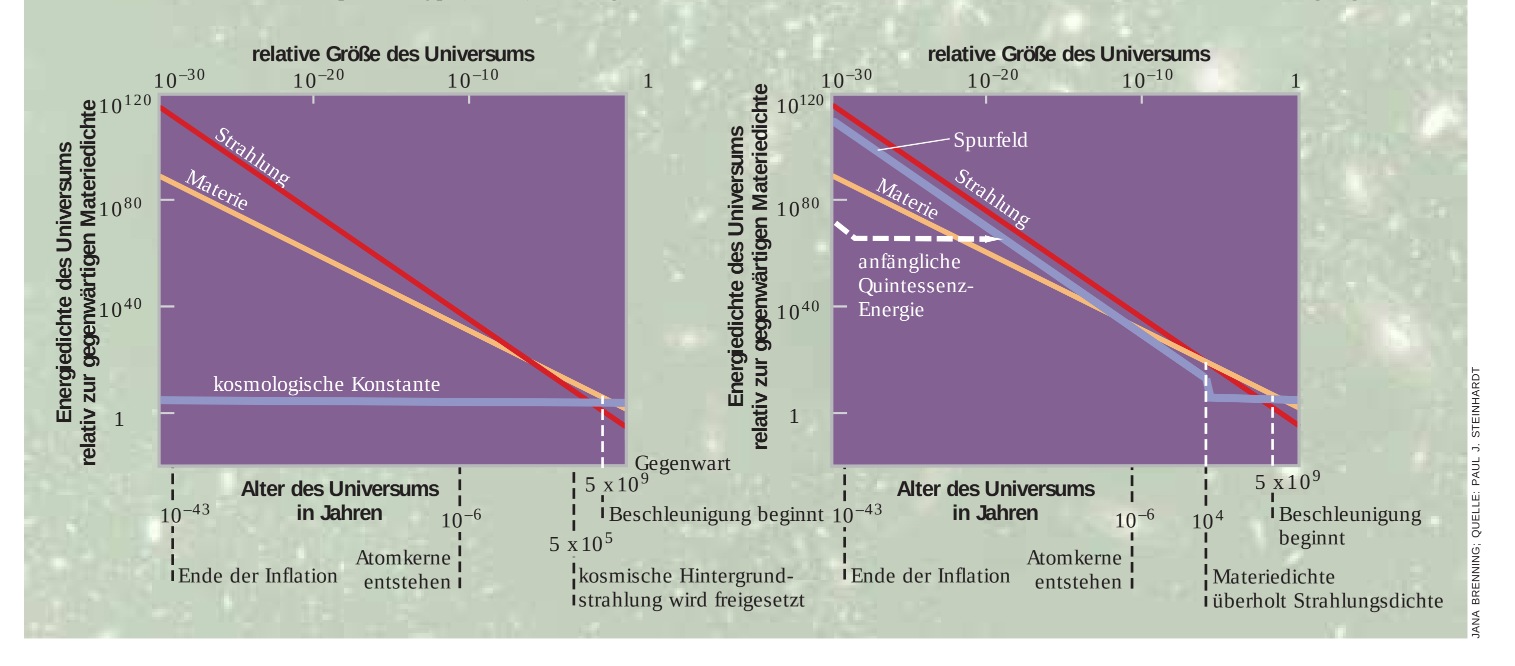
Die Expansionsrate des Universums hängt davon ab, welche Energieform vorherrscht. Materie wirkt bremsend, die kosmologische Konstante beschleunigend. Die Wirkung der Quintessenz liegt dazwischen: Sie beschleunigt die Expansion, aber schwächer. In ferner Zukunft könnte die Beschleunigung aufhören – oder auch nicht (gestrichelte Linien).



JANA BRENNING; QUELLE: ROBERT R. CALDWELL, DARTMOUTH COLLEGE, UND PAUL J. STEINHARDT

Kosmologische Konstante oder Variable?

Wenn die dunkle Energie aus der kosmologischen Konstante besteht, muss die Energiedichte von jeher so fein abgestimmt sein, dass sie die Materiedichte erst kürzlich überholt hat (links). Für eine Quintessenz vom Spurfeld-Typ (rechts) konvergieren beliebige Anfangswerte der Dichte (gestrichelt) zu einer gemeinsamen Spur (blaue Linie), die der Strahlungsdichte folgt, bis sie von der Materiedichte überholt wird. Dadurch friert das Spurfeld auf einen konstanten Wert ein und löst die kosmische Beschleunigung aus.



bekannte Energieform ist bis zu einem gewissen Grade weich. Vielleicht ist Festigkeit eine Idealisierung, die es in der Wirklichkeit nicht gibt. In diesem Falle wäre die kosmologische Konstante ein Ding der Unmöglichkeit, und die Quintessenz mit einem *w* nahe bei –1 wäre die vernünftigste Näherung.

Die Quintessenz als Feld zu beschreiben ist nur ein erster Schritt. Woher kommt ein derart seltsames Feld? Die Teilchenphysiker vermögen vom Aufbau der Atome bis zum Ursprung der Materie alles Mögliche zu erklären, aber die Quintessenz ist eine Art Findelkind. Die modernen Teilchentheorien enthalten vielerlei Felder, die das erforderliche Verhalten zeigen, aber über ihre kinetische und potenzielle Energie ist nicht genug bekannt, um sagen zu können, welche Felder – wenn überhaupt – tatsächlich negativen Druck erzeugen.

Eine exotische Möglichkeit wäre, dass die Quintessenz aus der Physik der zusätzlichen Dimensionen hervorgeht. Seit einigen Jahrzehnten wird die String-Theorie erforscht, die vielleicht die Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantenmechanik zu einer einheitlichen Theorie der fundamentalen Kräfte verknüpfen kann. Eine zentrale Eigenschaft der String-Modelle ist, dass sie zehn Dimensionen postulieren. Vier davon sind die uns bekannten drei Raumdimensionen und die Zeit. Die übrigen sechs müssen verborgen sein. In einigen Formulierungen sind sie eingerollt wie eine Kugel, deren Radius zu klein ist, um – zumindest mit heutigen Instrumenten – wahrgenommen zu werden. Eine neuere Erweiterung der String-Theorie, die so genannte M-Theorie, fügt noch eine elfte Dimension hinzu: Die gewöhnliche Materie ist demnach beschränkt auf zwei dreidimensionale Flächen, so genannte *branes* (von englisch *membranes*), zwischen denen eine mikroskopische Lücke entlang der elften Dimension klafft (siehe „Die unsichtbaren Dimensionen des Universums“ von Nima Arkani-Hamed et al., Spektrum der Wissenschaft 10/2000, S. 44).

Dunkle Materie – fein abgestimmt

Die Extra-Dimensionen sind für uns unsichtbar, doch falls sie wirklich existieren, sollten wir sie indirekt wahrnehmen können. Tatsächlich würden die zusammengerollten Dimensionen oder *branes* wie ein Feld wirken. Der Zahlenwert, den das Feld jedem Punkt des Raumes zuordnet, könnte dem Radius der Einrollung oder der Entfernung der Lücke entsprechen. Wenn der Radius oder die Lücke mit der Expansion des Universums langsam variiert, könnte das genau das hypothetische Quintessenz-Feld hervorrufen.

Was auch immer die Ursache der Quintessenz sein mag, ihre Dynamik könnte das diffizile Problem der Feinabstimmung lösen. Wir müssen uns fragen: Warum hat die kosmische Beschleunigung just zu diesem speziellen Zeitpunkt angefangen? Die dunkle Energie wurde erzeugt, als das Universum gerade 10^{-35} Sekunden alt war; dann muss sie fast 10 Milliarden Jahre lang verborgen geblieben sein – ein Zeitfaktor von mehr als 10^{50}. Erst dann, so die Beobachtungsdaten, gewann sie über die Materie die Oberhand und begann das Universum zu beschleunigen. Ist es nicht ein seltsamer Zufall, dass das Universum just dann, als denkende Wesen sich entwickelten, in den Schnellgang schaltete? Irgendwie scheinen das Schicksal von Materie und dunkler Energie miteinander verknüpft zu sein. Aber wie?

Wenn es sich bei der dunklen Energie um Vakuumenergie handelt, ist der Zufall praktisch unerklärlich. Einige Forscher wie Martin Rees von der Universität Cambridge und Steven Weinberg von der University of Texas in Austin favorisieren eine Erklärung auf Grund des anthropischen Prinzips. Vielleicht ist unser Universum nur eines unter vielen, und in ▶



jedem nimmt die Vakuumenergie einen anderen Wert an. Universen mit einer Vakuumenergie von mehr als vier Elektronenvolt pro Kubikmillimeter mögen häufiger sein, aber sie expandieren zu schnell, um Sterne, Planeten oder Leben zu bilden. Universen mit viel kleineren Werten sind vermutlich sehr selten. Unser Universum hätte den optimalen Wert. Nur in dieser „besten aller Welten“ könnten intelligente Wesen existieren und sich Gedanken über die Natur des Universums machen. Doch die Physiker sind uneins, ob das anthropische Prinzip eine annehmbare Erklärung darstellt („Die Erforschung unseres Universums – und anderer“, von Martin Rees, Spektrum der Wissenschaft, Spezial 1/2000, Fortschung im 21. Jahrhundert, S. 22).

Eine andere Antwort beruht auf einer Form der Quintessenz namens Spurfeld (*tracker field*), die Ratra und Peebles sowie Steinhardt mit Ivaylo Zlatev und Limin Wang von der University of Pennsylvania untersucht haben. Die Gleichungen für Spurfelder verhalten sich wie klassische Attraktoren in chaotischen Systemen. In solchen Systemen konvergiert die Bewegung für einen weiten Bereich von Anfangsbedingungen zu demselben Endresultat – wie eine Murmel, die von jedem Ausgangspunkt am Rand einer leeren Badewanne letztlich stets im Ausguss landet.

Ebenso muss die Energiedichte des Spurfelds nicht von vornherein auf einen bestimmten Wert abgestimmt werden, denn das Feld stellt sich schnell von selbst auf diesen Wert ein. Es gerät zwangsläufig in eine Spur, auf der seine Energiedichte einen fast konstanten Bruchteil der Dichte von Strahlung und Materie beibehält. In diesem Sinne imitiert die Quintessenz – trotz völlig anderer Beschaffenheit – Strahlung und Materie. Der Grund dafür ist, dass Strahlungs- und Materiedichte die kosmische Expansionsrate bestimmen, die wiederum das Tempo festlegt, in dem sich die Quintessenz-Dichte ändert. Bei genauerer Betrachtung stellt sich heraus, dass dieser Bruchteil allmählich zunimmt. Erst nach vielen Millionen oder Milliarden Jahren holt die Quintessenz auf.

Wir sind Nutznießer der kalten Epoche

Aber warum gewinnt die Quintessenz gerade zu diesem Zeitpunkt die Oberhand? Die kosmische Beschleunigung könnte genauso gut in ferner Vergangenheit oder ferner Zukunft beginnen, je nach Wahl der Konstanten in der Spurfeldtheorie. Wir sind wieder beim Zufall gelandet. Aber vielleicht entfesselte irgendein Ereignis in relativ naher Vergangenheit die Beschleunigung. Steinhardt hat zusammen mit Christian Armendáriz Picon und Viatcheslav Mukhanov von der Universität in München ein solches Ereignis vorgeschlagen: den Übergang von der durch Strahlung dominierten zu der von Materie dominierten Epoche unseres Universums. Nach der Urknalltheorie steckte die Energie des Universums anfangs hauptsächlich in Strahlung. Doch als das Universum sich abkühlte, verlor die Strahlung schneller an Energie als die gewöhnliche Materie. Als das All einige Zehntausend Jahre alt war – logarithmisch betrachtet also vor relativ kurzer Zeit –, verschob sich das Energieverhältnis zu Gunsten der Materie. Dieser Wechsel markierte den Beginn der von Materie dominierten Epoche, deren Nutznießer wir sind. Erst dann konnte die Schwerkraft beginnen, Materie zusammenzuziehen und daraus Galaxien und noch größere Strukturen zu bilden. Gleichzeitig änderte sich die Expansionsrate des Universums.

Bei einer Variante der Spurfeldmodelle löste diese Veränderung eine Serie von Ereignissen aus, die zu der heutigen kosmischen Beschleunigung geführt haben. Während des größten Teils der Geschichte des Universums lief die Quintessenz der Spur der Strahlungsenergie hinterher und blieb ein unbedeutender Bestandteil des Kosmos. Doch sobald im Universum die Materie dominierte, schleuderte der Wechsel der Expansionsrate die Quintessenz aus der Verfolgerspur. Statt der Strahlung oder der Materie zu folgen, wechselte der Druck der Quintessenz zu einem negativen Wert. Ihre Dichte blieb nahezu konstant und überholte schließlich die abnehmende Materiedichte. In diesem Bild ist die Tatsache, dass denkende Wesen und kosmische Beschleunigung fast gleichzeitig entstanden, kein Zufall mehr. Sowohl die Bildung von Sternen und Planeten, die für Leben notwendig sind, als auch die Umwandlung der Quintessenz in eine Komponente mit negativem Druck wurden demnach durch den Beginn der Materie-Dominanz ausgelöst.

Zunächst einmal werden die Kosmologen versuchen, die Quintessenz anhand beobachtbarer Indizien nachzuweisen. Weil ihr Wert für w sich von dem für die Vakuumenergie unterscheidet, bewirkt er eine andere Größe der kosmischen Beschleunigung. Präzisere Messungen von Supernovae über einen größeren Entfernungsbereich könnten die Entscheidung für eine der beiden Alternativen bringen. Astronomen haben zu diesem Zweck zwei neue Observatorien vorgeschlagen: die *Supernova Acceleration Probe* in einer Erdumlaufbahn und das bodengestützte *Large-Aperture Synoptic Survey Telescope*. Unterschiedliche Beschleunigungswerte erzeugen auch kleine Unterschiede im Winkeldurchmesser der heißen und kalten Stellen in der kosmischen Hintergrundstrahlung; die *Microwave Anisotropy Probe* und der Planck-Satellit könnten sie nachweisen.

Ein simulierter Blick in die Zukunft

Andere Tests messen, wie die Anzahl der Galaxien mit zunehmender Rotverschiebung variiert; daraus geht hervor, wie die Expansionsrate des Universums sich mit der Zeit geändert hat. Ein bodengestütztes Projekt namens *Deep Extragalactic Evolutionary Probe* soll nach diesem Effekt suchen.

Auf längere Sicht werden wir alle über die tief greifenden Folgen dieser revolutionären Entdeckungen nachdenken müssen. Sie führen zu einer ernüchternden Neuinterpretation unseres Platzes in

Literaturhinweise

Why Cosmologists Believe the Universe Is Accelerating. Von Michael S. Turner in: Type Ia Supernovae: Theory and Cosmology. Von Jens. C. Niemeyer und James W. Truran (Hg.). Cambridge University Press, 2000.

Cosmic Concordance and Quintessence. Von Limin Wang et al. in: Astrophysical Journal, Bd. 530, Nr. 1, S. 17 (2000).

Dynamical Solution to the Problem of a Small Cosmological Constant and Late-Time Cosmic Acceleration. Von C. Armendáriz Picon, V. Mukhanov und Paul J. Steinhardt in: Physical Review Letters, Bd. 85, S. 4438 (2000).

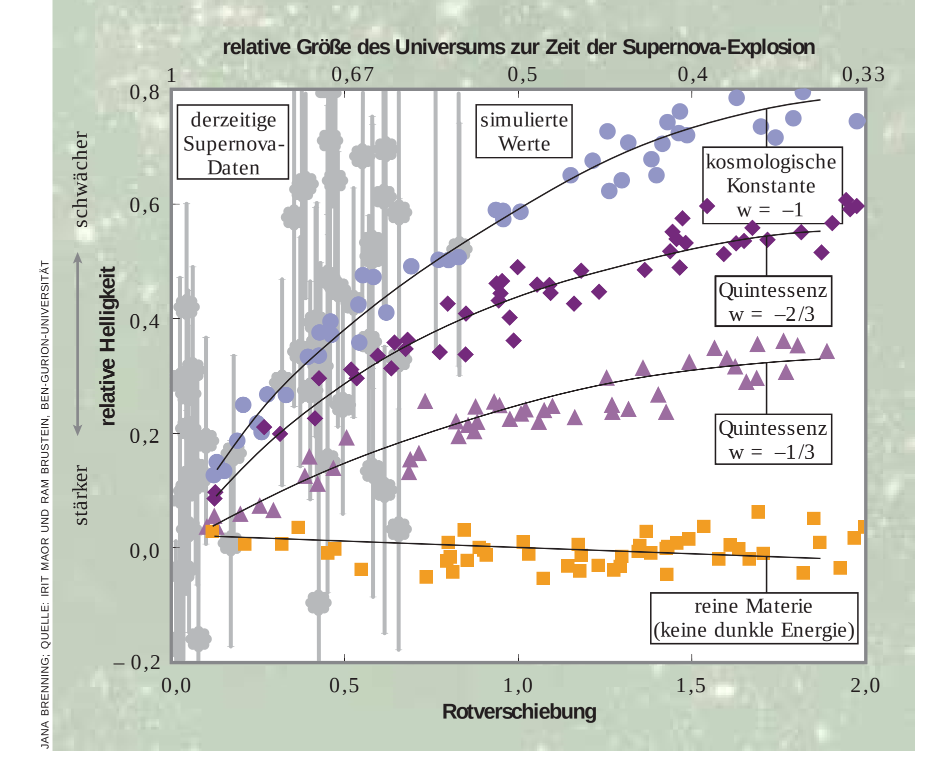
Cosmological Imprint of an Energy Component with General Equation of State. Von R. R. Caldwell et al. in: Physical Review Letters, Bd. 80, S. 1582 (1998).

The Observational Case for a Low-Density Universe with a Non-Zero Cosmological Constant. Von Jeremiah P. Ostriker und Paul J. Steinhardt in: Nature, Bd. 377, S. 600 (1995).

Zugehörige Weblinks finden Sie unter ***www.spektrum.de/aktuellesheft.html***

Simulation kosmischer Zukünfte

Supernova-Daten könnten die Entscheidung zwischen Quintessenz und kosmologischer Konstante herbeiführen. Da letztere das Universum stärker beschleunigt, wären Supernovae einer bestimmten Rotverschiebung weiter entfernt und deshalb weniger leuchtstark. Mit den Daten heutiger Teleskope (grau) lassen sich die beiden Alternativen nicht unterscheiden, wohl aber mit der geplanten Supernova Acceleration Probe. Die von vier unterschiedlichen Modellen vorhergesagten Supernova-Helligkeiten sind in verschiedenen Farben eingetragen.



JANA BRENNING; QUELLE: IRIT MAOR UND RAM BRUSTEIN, BEN-GURION-UNIVERSITÄT

der kosmischen Geschichte. Am Anfang – oder zumindest zum frühesten Zeitpunkt, von dem wir irgendetwas wissen – gab es die Inflation: eine Phase beschleunigter Expansion kurz nach dem Urknall. Der Raum war damals nahezu frei von Materie, und ein quintessenzähnliches Quantenfeld mit negativem Druck überwog. Während dieser Epoche dehnte sich das Universum um einen größeren Faktor aus als in den 15 Milliarden Jahren seit Ende der Inflation. Am Ende der Inflationsphase zerfiel dieses Feld zu einem heißen Gas aus Quarks, Gluonen, Elektronen, Licht und dunkler Energie.

Tausende Jahre lang war der Raum so dicht mit Strahlung gefüllt, das keinerlei Atome entstehen konnten, von größeren Gebilden ganz zu schweigen. Dann übernahm die Materie die Führung. Das nächste Stadium – unsere Epoche – ist durch stetige Abkühlung, Kondensation und die Bildung immer größerer komplexer Strukturen gekennzeichnet. Aber diese Epoche geht zu Ende. Die kosmische Beschleunigung kehrt zurück. Das uns bekannte Universum – mit leuchtenden Sternen, Galaxien und Galaxienhaufen – scheint nur ein kurzes Zwischenspiel zu sein. Wenn in den nächsten zehn und mehr Milliarden Jahren die Beschleunigung die Oberhand gewinnt, werden Materie und Energie im Universum immer stärker verdünnt, und der Raum wird sich zu schnell ausdehnen, als dass sich neue Strukturen bilden könnten. Der Kosmos wird immer lebensfeindlicher (siehe „Das Schicksal des Lebens im Universum“ von Lawrence M. Krauss und Glenn D. Starkman, Spektrum der Wissenschaft 1/2000, S. 52). Falls die Beschleunigung von der Vakuumenergie verursacht wird, ist die Geschichte des Kosmos damit beendet: Die Planeten, Sterne und Galaxien, die wir heute sehen können, sind der Gipfel der kosmischen Entwicklung.

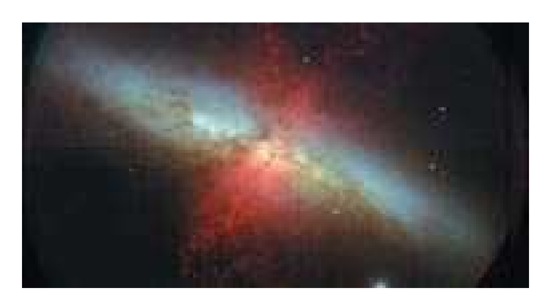
Doch falls die Quintessenz Ursache der Beschleunigung ist, muss das Ende noch geschrieben werden. Die Expansion könnte sich immerfort beschleunigen, oder die Quintessenz könnte in neue Formen von Materie und Strahlung zerfallen, die das Universum erneut bevölkern. Weil die Dichte der dunklen Energie so gering ist, würde die aus ihrem Zerfall hervorgehende Materie vermutlich zu wenig Energie haben, um etwas Interessantes zu ergeben. Unter gewissen Umständen könnten beim Zerfall der Quintessenz aber auch einzelne Blasen entstehen. Ihr Inneres wäre leer, aber die Blasenwand wäre Schauplatz heftiger Aktivität. Die Wand würde auswärts wandern und dabei die gesamte Energie aus dem Zerfall der Quintessenz aufnehmen. Gelegentlich würden zwei Blasen mit einem fantastischen Feuerwerk kollidieren. Bei diesem Prozess könnten massereiche Teilchen wie Protonen und Neutronen entstehen – und vielleicht Sterne und Planeten.

Für zukünftige Bewohner würde das Universum höchst inhomogen aussehen; das Leben wäre auf weit voneinander entfernte Inseln beschränkt, umgeben von riesigen Leerräumen. Würden sie jemals herausfinden, dass ihr Kosmos ursprünglich dem homogenen und isotropen Universum entstammt, das wir heute um uns sehen? Würden sie jemals wissen, dass das Universum einst Leben hervorbrachte, das dann erstarb, bis es eine zweite Chance bekam?

Vielleicht werden Experimente schon bald eine Vorstellung davon geben, welche Zukunft unserem Universum bevorsteht. Wird es in der Sackgasse der Vakuumenergie enden oder das unerschöpfliche Potenzial der Quintessenz anzapfen? Letztlich hängt die Antwort davon ab, ob die Quintessenz einen Platz im Grundgefüge der Natur hat – vielleicht im Geltungsbereich der String-Theorie. Über unseren Platz in der kosmischen Geschichte entscheidet somit das Zusammenwirken des Allerkleinsten mit dem Allergrößten. ■

Jeremiah P. Ostriker *und* ***Paul J. Steinhardt*** *sind Professoren an der Princeton University und arbeiten seit sechs Jahren zusammen. Ihre Vorhersage der beschleunigten Expansion antizipierte 1995 die spektakuläre Bestätigung durch Supernova-Messungen um mehrere Jahre. Ostriker erkannte als einer der Ersten das Vorherrschen dunkler Materie und die Wichtigkeit von heißem intergalaktischem Gas. Steinhardt war einer der Schöpfer der Inflationstheorie und des Konzepts der Quasikristalle.*

Kosmologie – ein Zustandsbericht



Das kosmologische Theoriegebäude gleicht derzeit einem Gerüst, das zwar fest gefügt ist, aber große Lücken aufweist. Für die offenen Fragen stehen Begriffe wie dunkle Materie, Inflation und Quintessenz – spannende Zeiten für die Kosmologie.

Von P. James E. Peebles

Wir Kosmologen erleben gerade eine besonders aufregende Zeit: Fluten neuer Beobachtungsdaten strömen herein, die Ideen sprudeln nur so und die Forschung erprobt diese Ideen unermüdlich an den Fakten. Aber es sind auch verwirrende Zeiten. Die derzeit diskutierten Ideen können unmöglich alle richtig sein; sie vertragen sich nicht miteinander. Wer soll die Fortschritte beurteilen? Hier meine Meinung dazu.

Zwar ist viel von theoretischen Umstürzen die Rede, aber dennoch haben die Kosmologen für unser Forschungsgebiet ein festes Fundament errichtet. Im Laufe der vergangenen siebzig Jahre haben wir überreichlich Beweise dafür gesammelt, dass unser Universum expandiert und sich abkühlt. Erstens: Das Licht ferner Galaxien ist zum Rot hin verschoben, so wie es sein sollte, wenn der Raum expandiert und die Galaxien voneinander weggezogen werden. Zweitens: Ein Ozean thermischer Strahlung erfüllt den Raum, so wie es sein sollte, wenn der Raum früher dichter und heißer war. Drittens: Das Universum enthält riesige Mengen Deuterium und Helium, so wie es sein sollte, wenn die Temperaturen früher viel höher waren. Viertens: Milliarden Lichtjahre entfernte Galaxien sehen deutlich jünger aus, so wie es sein sollte, wenn sie den Zeiten näher sind, als es noch keine Galaxien gab. Und schließlich: Die Krümmung der Raumzeit scheint vom Materiegehalt des Universums abzuhängen, so wie es sein sollte, wenn sich das Universum nach den Vorhersagen der Einsteinschen Gravitationstheorie – der Allgemeinen Relativitätstheorie – ausdehnt.

Expansion und Abkühlung des Universums gehören zum Wesen der Urknalltheorie. Ich vermeide dabei das Wort Explosion: Die Urknalltheorie beschreibt, wie das Universum sich entwickelt und nicht, wie es begann.

Der Urknall ist gesichert

Ich vergleiche den Prozess des Verknüpfens solch überzeugender Resultate – ob in der Kosmologie oder in einer anderen Wissenschaft – mit dem Bau eines Gerüsts. Wir versuchen jedes Indiz abzusichern, indem wir unterschiedliche Messungen als Stützbalken benutzen. Unser Rahmengerüst für die Expansion des Universums ist solide und stabil. Die Urknalltheorie wird nicht mehr ernsthaft in Frage gestellt, denn alles passt viel zu gut zusammen. Nicht einmal die radikalste Alternative – die neueste Wiedergeburt der Steady-State-Theorie – bestreitet, dass das Universum sich ausdehnt und abkühlt. Gewiss gibt es in der Kosmologie weiterhin unterschiedliche Meinungen, aber sie betreffen Ergänzungen des festen Grundgerüsts.

Zum Beispiel wissen wir nicht, was mit dem Universum geschah, bevor es expandierte. Die führende Theorie – die so genannte Inflation – ist eine interessante Ergänzung des Gerüsts, aber ihr fehlt die Abstützung. Bevor die laufenden Messungen eindeutige Anzeichen der Inflation liefern, möchte ich keine Wette darauf abschließen. Ich kritisiere die Theorie nicht, ich meine nur, dass diese mutige Pionierarbeit erst noch getestet werden muss.

Viel sicherer sind die Indizien dafür, dass der größte Teil der Masse im Universum aus dunkler Materie besteht, die in den äußeren Spiralarmen von Galaxien gehäuft vorkommt. Wir haben auch vernünftige Argumente für Einsteins berüchtigte kosmologische Konstante oder etwas Ähnliches; sie wäre die treibende Kraft der beschleunigten Expansion, die im Universum stattzufinden scheint.

Vor einem Jahrzehnt begrüßten die Kosmologen die dunkle Materie als elegante Erklärung für die Bewegung von Sternen und Gas in Galaxien. Hingegen stieß die kosmologische Konstante auf fast einhellige Ablehnung; doch nun wird sie – oder der verwandte Begriff Quintessenz – mehrheitlich akzeptiert (siehe „Die Quintessenz des Universums", Seite 32).

Die Elementarteilchenphysiker sehen nun in der kosmologischen Konstante sogar eine interessante Herausforderung für die Quantentheorie. Dieser Meinungswandel ist kein Zeichen von Schwäche; er zeigt ein fruchtbares Chaos um ein langsam wachsendes solides Gerüst an.

BEIDE ABBILDUNGEN: SUBARU TELESCOPE, NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF JAPAN



Zensuren für kosmologische Hypothesen

Hypothese	Note	Bemerkungen
Das Universum entwickelte sich aus einem heißen, dichten Anfangszustand.	+ Sehr gut	Überwältigende Beweise aus vielen Bereichen von Astronomie und Physik.
Das Universum expandiert gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie.	+ Gut	Besteht alle bisherigen Tests, aber nur wenige Tests waren streng.
In Galaxien überwiegt dunkle Materie aus exotischen Teilchen.	+ Befriedigend	Viele indirekte Hinweise, aber die Teilchen müssen noch gefunden und konkurrierende Theorien ausgeschlossen werden.
Die Masse des Universums ist größtenteils gleichmäßig verteilt; sie wirkt wie Einsteins kosmologische Konstante und beschleunigt die Expansion.	– Ausreichend	Passt gut zu neuesten Messungen; aber die Indizien sind noch lückenhaft und theoretische Probleme ungelöst.
Das Universum machte zu Beginn eine Phase rapider Expansion durch – die so genannte Inflation.	– Mangelhaft	Elegante Theorie, aber noch ohne direkte Beweise; erfordert enorme Erweiterung der physikalischen Gesetze.

ROBERT GENDLER

Wir lernen von der Natur und passen dabei unsere Konzepte entsprechend an. Neuerdings sprechen gewisse Anzeichen für eine Beschleunigung der kosmischen Expansion: die Helligkeit von Supernovae, das Alter der ältesten Sterne, die Krümmung des Lichts um ferne Massen und die Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung (siehe „Revolution in der Kosmologie", Spektrum der Wissenschaft 3/1999, S. 38).

Die Hinweise sind eindrucksvoll, aber mich beunruhigen gewisse Details im Fall der kosmologischen Konstante, etwa mögliche Widersprüche zur Entwicklung der Galaxien und ihrer räumlichen Verteilung. Die Theorie des beschleunigt expandierenden Universums ist derzeit noch eine Baustelle. Ich bewundere die Architektur, möchte aber jetzt noch nicht einziehen.

Wie soll man die Medienberichte über den Fortschritt der Kosmologie beurteilen? Ich fühle mich nicht wohl bei Artikeln, die auf dem Interview einer einzigen Person beruhen. Forschung ist eine komplizierte und unübersichtliche Angelegenheit. Sogar der erfahrenste Wissenschaftler vermag kaum den großen Überblick zu behalten. Woher weiß ich, dass das gerade dieser Person gelingt? Gewiss kann auch die ganze Gemeinschaft der Wissenschaftler in die falsche Richtung gehen, aber das geschieht seltener. Deswegen ist mir lieber, wenn der Journalist einen Querschnitt der wissenschaftlichen Gemeinschaft befragt und Übereinstimmung darüber feststellt, dass ein bestimmtes Resultat ernst zu nehmen ist. Das Resultat wird interessanter, wenn andere es reproduzieren. Es wird überzeugend, wenn unabhängige Indizienketten zu derselben Schlussfolgerung führen. Meiner Meinung nach beschreiben die besten Wissenschaftsberichte nicht nur die neuesten Ideen und Entdeckungen, sondern auch das nötige, wenngleich oft langwierige Überprüfen und das Errichten des Stützgebälks.

Mit der Zeit werden Inflation, Quintessenz und andere derzeit diskutierte Konzepte ihren Platz im Gerüst finden – oder man wird sie fallen lassen und durch etwas Besseres ersetzen. In gewisser Weise machen wir uns damit selbst arbeitslos. Aber das Universum ist gelinde gesagt kompliziert, und es wäre einfältig zu glauben, uns würden in absehbarer Zeit die Forschungsziele ausgehen. Das herrschende Durcheinander zeigt, dass wir auf dem richtigen Weg sind: Auf der Baustelle herrscht reger Betrieb. ■

P. James E. Peebles *war führend an der Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung und der Elementsynthese beim Urknall beteiligt. Er erhielt zahlreiche Auszeichnungen und ist nun emeritierter Professor an der Princeton University.*

Literaturhinweise

Die Geburt des Kosmos aus dem Nichts. Die Theorie des inflationären Universums. Von Alan H. Guth. Droemer Knaur, München 1999.

Vor dem Anfang. Eine Geschichte des Universums. Von Martin Rees. Fischer, Frankfurt 1998.

Die Entwicklung des Universums. Von P. James E. Peebles et al. in: Spektrum Spezial: Leben und Kosmos. Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg 1994.

Concluding Remarks on New Cosmological Data and the Values of the Fundamental Parameters. Von P. James E. Peebles in: IAU Symposium 201: New Cosmological Data and the Values of the Fundamental Parameters. Von A. N. Lasenby et al. (Hg.), August 2000.

The Accelerating Universe: Infinite Expansion, the Cosmological Constant, and the Beauty of the Cosmos. Von Mario Livio und Allan Sandage. John Wiley & Sons, 2000.

Weblinks finden Sie unter ***www.spektrum.de/aktuellesheft.html***

Eine Alternative zum Inflationsmodell

Falls die neue Kosmologie versagen sollte, zeichnet sich am Horizont eine Alternative zum Inflationsmodell ab. Einige Forscher spielen mit der Idee, die Lichtgeschwindigkeit könnte früher einen höheren Wert gehabt haben als heute – einstweilen freilich pure Spekulation.

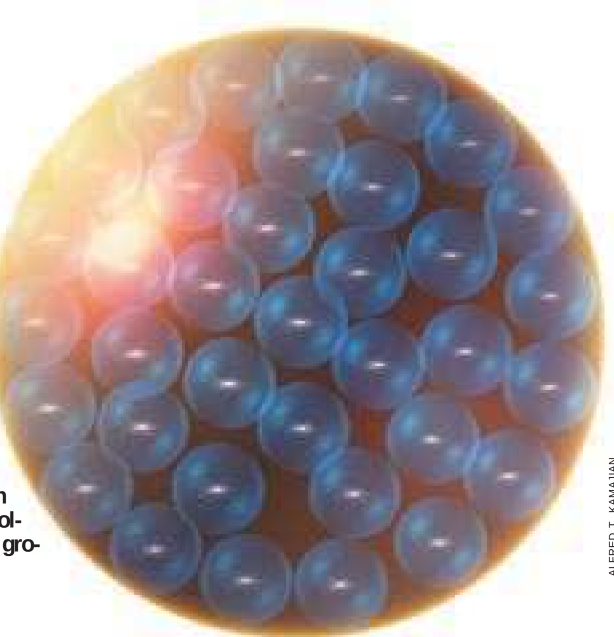
Von João Magueijo

Auch wenn die Theorie der kosmischen Inflation den Nimbus der Unbesiegbarkeit erlangt hat, ziehen alternative Theorien weiterhin einiges Interesse auf sich. Die Steady-State-Theorie, die bis in die sechziger Jahre als wichtigste Alternative zum Urknallmodell galt, wird von einer kleinen Gruppe von Befürwortern weiter am Leben erhalten. Die Vor-Urknall-Theorie – eine durch die String-Theorie angeregte Überarbeitung des Inflationsmodells – gewinnt ebenfalls einige Aufmerksamkeit. Aber die vielversprechendste und provokanteste Alternative ist wohl die Theorie der veränderlichen Lichtgeschwindigkeit oder VSL-Theorie (*varying-speed-of-light theory*), die meine Kollegen und ich seit einigen Jahren entwickeln. Diese abweichenden Ansichten bringen zumindest Abwechslung und Farbe in die Kosmologie – und verleihen einem nagenden Zweifel Ausdruck: Könnte der vom Inflationsmodell und seinen Abwandlungen ausgelöste Enthusiasmus einen monströsen Irrtum überdecken?

Die üblichen kosmologischen Theorien, etwa die der Inflation, beruhen auf einer entscheidenden Annahme: dass die Lichtgeschwindigkeit und andere fundamentale physikalische Parameter zu allen Zeiten denselben Wert hatten. Darum heißen solche Größen ja auch Naturkonstanten. Diese Annahme zwang die Kosmologen, die Inflation mitsamt ihren fantastischen Schlussfolgerungen zu akzeptieren. Und tatsächlich zeigen die Experimente, dass die mutmaßlichen Konstanten sich mit der Zeit nicht dramatisch verändern. Aber die Forscher haben die Größen nur über die letzten paar Milliarden Jahre hinweg untersucht. Das Postulat, sie seien seit Anbeginn des Universums konstant geblieben, kommt einer äußerst gewagten Extrapolation gleich. Könnten die vermeintlichen Konstanten in einem Urknall-Universum tatsächlich mit der Zeit variieren – so wie dessen Temperatur und Dichte?

Die Theoretiker finden, einige Konstanten könnten ihren Status eher aufgeben als andere. Zum Beispiel wurden die Gravitationskonstante G und die Elektronenladung e schon öfters ohne großes Aufsehen theoretisch in Frage gestellt. Von Paul Diracs bahnbrechender Arbeit über veränderliche Konstanten aus den dreißiger Jahren bis zu den neuesten String-Theorien gehört es schon fast zum guten Ton, die Gravitationskonstante G zu entthronen. Hingegen blieb die Lichtgeschwindigkeit c sakrosankt. Der Grund ist klar: Die Konstanz von c und ihr Status als universelle Grenzgeschwindigkeit sind Fundamente der Relativitätstheorie. Der Einfluss der Relativitätstheorie ist so groß, dass die Konstanz von c nun in allen mathematischen Werkzeugen der Physiker steckt. „Variable Lichtgeschwindigkeit“ ist nicht einmal ein unfeines Wort; der Ausdruck existiert überhaupt nicht im physikalischen Vokabular.

Dennoch könnte es den Kosmologen nicht schaden, ihre Sprache zu erweitern. Im Zentrum der Inflationstheorie steht das so genannte Horizontproblem der Urknall-Kosmologie: Zu jeder beliebigen Zeit seit dem Urknall kann das Licht – und damit auch jede Wechselwirkung – nur eine begrenzte Entfernung zurückgelegt haben. Als das Universum zum Beispiel ein Jahr alt war, konnte das Licht nur – ungefähr – ein Lichtjahr hinter sich gebracht haben. Das Universum ist daher durch Horizonte fragmentiert, die Regionen abgrenzen, welche füreinander unsichtbar sind.



Horizontproblem

Im Alter von einem Jahr war das Universum in isolierte Bereiche unterteilt, die durch „Horizonte“ mit einem Lichtjahr-Radius abgegrenzt waren (blaue Kugeln). Heute hat der Horizont einen Radius von etwa 15 Milliarden Jahren (rote Kugel) und umfasst unzählige dieser Bereiche. Seltsam ist, dass sie alle trotz ihrer anfänglichen Isolation ziemlich gleich aussehen. In der Erklärung dieser geheimnisvollen Gleichförmigkeit besteht der große Erfolg der Inflationstheorie.

ALFRED T. KAMAJIAN

Die Kurzsichtigkeit des Universums ist für Kosmologen äußerst irritierend. Sie schließt physikalische Erklärungen – das heißt solche, die auf physikalischen Wechselwirkungen beruhen – für die Frage aus, warum das frühe Universum so gleichförmig war. Im Rahmen der Standard-Urknalltheorie lässt sich die Gleichförmigkeit nur durch Feinabstimmung der Anfangsbedingungen erklären – eigentlich ein Rückgriff auf Metaphysik.

Das Inflationsmodell umgeht dieses Problem geschickt. Es profitiert von der Tatsache, dass für eine Lichtwelle in einem expandierenden Universum die Entfernung zum Startpunkt größer ist als die zurückgelegte Strecke – denn die Expansion dehnt den bereits zurückgelegten Weg immer weiter aus. Zur Veranschaulichung stellen wir uns einen Autofahrer vor, der eine Stunde lang mit einer Geschwindigkeit von 60 Kilometer pro Stunde fährt. Der Fahrer hat zwar auf der Straße 60 Kilometer zurückgelegt, aber wenn die Straße selbst in der Zwischenzeit länger wurde, ist die Entfernung vom Ausgangspunkt am Ende größer als 60 Kilometer. Die Inflationstheorie postuliert nun für das frühe Universum eine derart schnelle Expansion, dass die Reichweite des Lichtes ungeheuer groß war. Scheinbar unzusammenhängende Regionen standen dadurch miteinander in Verbindung und erreichten eine gemeinsame Temperatur und Dichte. Erst als die inflationäre Expansion aufhörte, verloren diese Regionen den Kontakt.

Wie leicht einzusehen ist, könnte dasselbe ebenso gut durch eine im frühen Universum erhöhte Lichtgeschwindigkeit erreicht worden sein. Dieser Gedanke brachte Andreas Albrecht von der University of California in Davis, John Barrow von der Universität Cambridge und mich auf die VSL-Theorie. Im Gegensatz zu einer verbreiteten Meinung verfolgten wir damit nicht die Absicht, die Befürworter der Inflation zu ärgern; Albrecht ist sogar einer der Väter der Inflationstheorie. Wir meinten, Vorzüge und Mängel der Inflation würden deutlicher, wenn es eine Alternative gäbe, und sei sie noch so unausgegoren.

Brutaler Anschlag auf Einstein

Natürlich verlangt die VSL-Theorie ein Überdenken der Grundlagen und der Sprache der Physik, und aus diesem Grund sind viele verschiedene Realisierungen denkbar. Unser allererster Vorschlag kam einem brutalen Anschlag auf die Relativitätstheorie gleich – allerdings mit dem mildernden Umstand, dass er außer dem Problem des gleichförmigen Universums viele weitere Rätsel löste. Zum Beispiel erklärt unsere Theorie den winzigen, aber von Null verschiedenen Wert der kosmologischen Konstante im heutigen Universum. Der Grund ist, dass die von der kosmologischen Konstante repräsentierte Vakuumenergiedichte sehr stark von der Lichtgeschwindigkeit c abhängt. Eine angemessene Senkung von c reduziert die andernfalls dominierende Vakuumenergie auf ein harmloses Niveau. In den üblichen Theorien hingegen lässt sich die Vakuumenergie nicht verdünnen.

Aber unsere Formulierung ist nur eine Möglichkeit, und das Bemühen, die VSL-Theorie mit der Relativitätstheorie zu versöhnen, regt zur Zeit einige Forschungsarbeiten an. John Moffat von der Universität Toronto (Kanada) und später Ian T. Drummond von der Universität Cambridge versuchten durch behutsamere Versionen der VSL-Theorie den Relativitätstheoretikern entgegenzukommen. Wie es scheint, ist die Konstanz von c letztlich gar nicht wesentlich für die Relativitätstheorie; die Theorie kann auf anderen Postulaten aufgebaut werden. Wenn das Universum der String-Theorie zufolge eine dreidimensionale Membran in einem höherdimensionalen Raum ist, könnte die scheinbare Lichtgeschwindigkeit in unserer Welt variieren, während das eigentlich fundamentale c konstant bleibt.

Letztlich vermag nur das Experiment zu entscheiden, ob die Natur sich anfangs inflationär verhielt oder ob sie ein variables c vorzieht. Die VSL-Theorie ist derzeit viel weniger weit entwickelt als das Inflationsmodell; sie muss erst noch konkrete Aussagen über die kosmische Hintergrundstrahlung machen. Andererseits deuten einige Experimente darauf hin, dass die so genannte Feinstrukturkonstante vielleicht gar nicht konstant ist. Eine variable Lichtgeschwindigkeit würde solche Resultate erklären.

Ob diese Beobachtungen genauerer Prüfung standhalten, bleibt abzuwarten; zunächst stellt die VSL-Theorie die Theoretiker vor große Herausforderungen, denn sie rüttelt viel stärker an den Grundfesten der Physik als das Inflationsmodell. Vorläufig ist die VSL-Theorie noch weit davon entfernt, zur etablierten Physik zu gehören: Sie ist pure Spekulation. ■





Horizonterweiterung

Die Inflation ist nicht die einzige Lösung des Horizontproblems. Vielleicht haben die Bedingungen im frühen Universum dem Licht erlaubt, sich viel schneller als heutzutage fortzupflanzen – eine Milliarde Mal schneller oder vielleicht sogar mehr. Das schnelle Licht sorgte für größere zusammenhängende Bereiche (blaue Kugel). Als es sich auf seine heutige Geschwindigkeit verlangsamte, schrumpfte der Horizont (rote Kugel). Auf diese Weise vermögen wir heutzutage nur einen Teil eines der anfänglichen Bereiche zu sehen, und darum erscheint uns das Universum so gleichmäßig.

João Magueijo *lehrt theoretische Physik am Imperial College in London. Seine Forschungsinteressen reichen von der Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung zu topologischen Defekten, Quintessenz und Schwarzen Löchern.*

Literaturhinweise

The Varying Speed of Light as a Solution to Cosmological Puzzles. Von Andreas Albrecht und João Magueijo in: Physical Review D, Bd. 59, Heft 4, Paper Nr. 043516; 15. Februar 1999.

Big Bang Riddles and Their Revelations. Von João Magueijo und Kim Baskerville in: Philosophical Transactions of the Royal Society A, Bd. 357, Heft 1763, S. 3221; 15. Dezember 1999.

Covariant and Locally Lorentz-Invariant Varying Speed of Light Theories. Von João Magueijo in: Physical Review D, Bd. 62, Heft 10, Paper Nr. 103521; 15. November 2000.

Hilfe bei Alzheimer?

Noch immer können Ärzte die Alzheimer-Krankheit nicht heilen. Doch von dem Zerstörungsprozess im Gehirn setzen Molekularbiologen und Genetiker immer mehr Puzzleteile zu einem Bild zusammen. Zumindest an Mäusen gelang es jetzt, alzheimerähnlichen Erscheinungen durch eine Impfung entgegenzuwirken.

Von Peter H. St George-Hyslop

Viele Familien kennen das: Die ältere Angehörige wirkt anfangs nur etwas zerstreut, kann sich Neues schlecht merken und wiederholt sich öfter.

Nun aber wird die früher so rege und aufgeschlossene Dame zusehends vergesslich, fragt immer wieder das Gleiche, sitzt oft nur teilnahmslos da. Sie weiß sich immer weniger zu beschäftigen. Sogar das Interesse an den Enkelkindern scheint sie zu verlieren. Schließlich kann dieser alte Mensch komplizierteren Unterhaltungen nicht mehr folgen und selbst nichts Anspruchsvolleres mehr tun.

Irgendwann kommt die gefürchtete Zeit, in der die Kranke nicht einmal mehr vom nahen Supermarkt nach Hause findet und selbst nächste Verwandte und Freunde nicht erkennt. Innerhalb weniger Jahre wird die aktive und lebenslustige Frau zum Pflegefall. Sogar bei banalsten Alltagsverrichtungen benötigt sie nun Hilfe, vom Waschen, Anziehen und Essen bis hin zum Toilettengang.

Zunehmender geistiger Verfall bis zu Verblödung und Schwachsinn gehört zum Erscheinungsbild mehrerer Krankheiten, die Mediziner allgemein als „Demenz“ bezeichnen. Bei ihnen allen versagen Teile des Gehirns immer mehr ihre Arbeit. Gedächtnis, Urteilsvermögen und klares Denken gehen verloren, auch das Gefühlsleben wird immer labiler. Demenzen sind keineswegs eine heutige Erscheinung. Schilderungen solcher Persönlichkeitsveränderungen tauchen schon im alten Griechenland auf. Nur erleben wir solche Menschen heute wegen unserer höheren Lebenserwartung öfter. Denn die meisten Formen von geistigem Abbau treten eher in fortgeschrittenem Alter auf. In westlichen Gesellschaften entwickeln sich diese Krankheiten inzwischen zu einem ernsthaften allgemeinen gesundheitlichen und sozialen Problem: Rund fünfzehn Prozent aller Fünfundsechzigjährigen leiden in irgendeiner Form unter einer Demenz, im Alter von fünfundachtzig sogar jeder Dritte.

Von allen Demenzformen ist die Alzheimer-Krankheit die häufigste. Allein in Deutschland leben über 800 000, nach anderen Statistiken eine Million Alzheimer-Patienten. In den Vereinigten Staaten sind vier Millionen Menschen von dem Leiden betroffen. Experten rechnen damit, dass es in fünfundzwanzig Jahren weltweit 22 Millionen Alzheimer-Kranke geben wird.

Trotz des häufigen Vorkommens der Alzheimer-Demenz verstanden die Wissenschaftler noch bis vor kurzem die Ursachen der Krankheit so gut wie gar nicht. Obwohl sich das allmählich ändert, können Ärzte den geistigen Verfall heute zwar manchmal etwas verlangsamen. Aber heilen können sie die Kranken bisher nicht, auch nicht dem Leiden vorbeugen. Ganz so hoffnungslos wie noch vor wenigen Jahren ist die Situation aber nicht mehr. Denn inzwischen kristallisiert sich aus epidemiologischen, genetischen, molekular- und zellbiologischen Befunden ein Gesamtbild heraus, das allmählich einiges von den Entstehungsmechanismen der Alzheimer-Krankheit klarer erkennen lässt.

Verfall von Hirnregionen

Nach heutigem Wissen läuft bei Alzheimer im Gehirn mit bestimmten Proteinen etwas ganz und gar schief. Ihre Bearbeitung funktioniert nicht normal. Dadurch häufen sich in Gehirnzellen und in Zellzwischenräumen toxische Proteinstücke an. Interessanterweise zeichnen sich auch für andere neurodegenerative Erkrankungen Fehler im Umgang mit bestimmten Proteinen ab – darunter die so genannte Picksche Erkrankung (oder frontotemporale Demenz, eine erbliche degenerative Hirnerkrankung, die meist zwischen dem fünfzigsten und sechzigsten Lebensjahr beginnt), die Parkinson-Krankheit und die Creutzfeldt-Jakob-Krankheit (von der eine so genannte neue Variante im Verdacht steht, durch den Erreger der Rinderseuche BSE übertragen zu werden). Auf Grund der neuen Erkenntnisse ergeben sich auch Ideen für die Behandlung des Gehirnverfalls. Zum Beispiel gerieten jüngst Tierversuche in die Schlagzeilen, bei denen Forscher erproben, ob der pathologische Abbau von Gehirnfunktionen durch Impfung aufgehalten oder sogar rückgängig gemacht werden kann. Vielleicht wird man sich tatsächlich irgendwann gegen Alzheimer impfen lassen können.

Mediziner wissen schon länger, dass das Gehirn eines Alzheimer-Kranken ▸

Steckbrief

Die Gehirne von Alzheimer-Patienten weisen abnorme, clusterartige Ablagerungen auf, die für den Verlust von Gehirnsubstanz verantwortlich sein könnten.

Amyloide Plaques

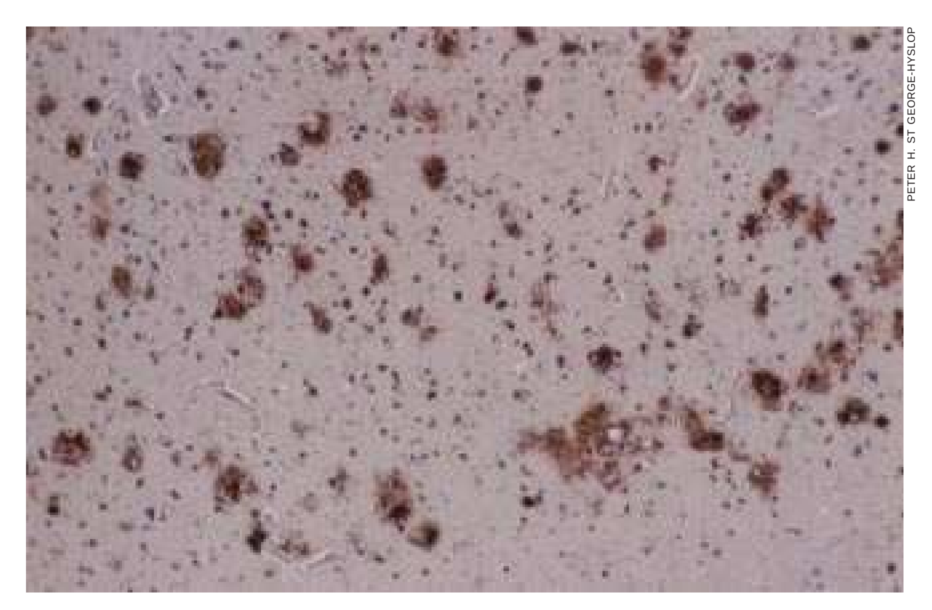
➤ Ablagerungen aus „β-Amyloid“ zwischen den Nervenzellen; dieses Peptid wird aus dem „β-Amyloid-Vorläuferprotein“ (βAPP) herausgeschnitten; β-Amyloid-Plaques entstehen bei Alzheimer besonders zahlreich im Hippocampus (einer Gedächtnisstruktur) und in der Großhirnrinde.

Neurofibrilläre Bündel

➤ Knäuel von paarweise umeinander gewundenen Fasern aus „Tau-Protein“; sie liegen in den Nervenzellen und behindern deren Stofftransport.



An dieser Frau beschrieb der Arzt Alois Alzheimer erstmals die nach ihm benannte Demenz. Als das Foto aufgenommen wurde, war die Patientin, Auguste D., bereits fast orientierungslos und besaß kaum noch Erinnerungen. Sie starb wenige Jahre später mit 55 Jahren.



PETER H. ST GEORGE-HYSLOP

Das reiche Vorkommen „amyloider Plaques“ (siehe Steckbrief) im Gehirn ist ein charakteristisches Kennzeichen bei der Alzheimer-Krankheit. Sie treten schon ziemlich früh im Krankheitsverlauf auf. Über den Grad der Demenz sagt ihre Menge jedoch nichts aus. In dieser lichtmikroskopischen Aufnahme von der Großhirnrinde eines Patienten erscheinen die Plaques als dunkle Flecken.

schon äußerlich stark verändert aussieht (Bild Seite 51). Eine mikroskopische Untersuchung erweist dann einen beträchtlichen Verlust von Nervenzellen in bestimmten Hirnregionen, so im Hippocampus – einer Struktur für das Gedächtnis – und in der Großhirnrinde, der Hauptschaltstelle für Vernunft, Sprache, Lernen und andere wichtige Denkprozesse.

In den siebziger Jahren wurde klar, dass einige der absterbenden Nervenzellen zur Kommunikation mit anderen Neuronen die Substanz „Acetylcholin“ verwenden. Betroffene Gehirngebiete leiden deswegen an Unterversorgung mit dem Signalstoff. Das Frühstadium der Demenz können Ärzte aber heute lindern und das Fortschreiten der Krankheit hinauszögern. Der Botenstoff wird nämlich teilweise abgebaut, nachdem er seine Aufgabe erfüllt hat. Dies leistet das Enzym Acetylcholinesterase. In den letzten zehn Jahren nun kamen Wirkstoffe – wie Tacrin (Cognex) oder Donepezil (Aricept) – auf den Markt, welche dieses Enzym hemmen. Sie erhöhen somit die Menge an Acetylcholin im Gehirn und helfen auf diese Weise, die Gehirnleistungen zu verstärken. Leider wirken die Mittel aber nicht mehr im Spätstadium der Demenz, wenn schon zu viele von diesen Nervenzellen fehlen, wenn also kaum noch Acetylcholin entsteht.

Im Zentrum vieler Alzheimer-Forschungen stehen die auffälligen Verklumpungen – Cluster – aus Proteinen oder deren Fragmenten, die in Gehirnpräparaten dieser Patienten unter dem Mikroskop als zwei Sorten von Ablagerungen erscheinen. Die eine Sorte liegt als abnorme Faserbündel im Innern von Nervenzellen vor (Bilder unten). Die zweite Sorte lagert außerhalb in den Zellzwischenräumen als „amyloide Plaques“ (Bild oben).

Zu den Faserbündeln in den Zellen: Die Forscher sprechen auch vom „neurofibrillären Gewirr“ oder von „Neurofibrillenknäuels“. Es handelt sich hierbei um Konglomerate von Proteinfasern, die sich jeweils paarweise umeinander winden. In den achtziger Jahren stellte sich heraus, dass diese neurofibrillären Bündel aus einem Protein namens „Tau“ bestehen. Dieses Protein bindet sich an Tubulin, den Grundbaustein der so genannten Mikrotubuli. Das sind wichtige Zellstrukturen, die eine Zelle innen als Stützgerüst durchziehen, ihr damit Festigkeit und Form verleihen. Die Mikrotubuli bilden in der Zelle außerdem ein Netz von Transportstraßen, entlang derer Nährstoffe, zelleigene Moleküle und auch größere Strukturen wandern.

Verklumpte Proteine

Allerdings kommen verklumpende Tau-Fasern nicht nur bei Alzheimer vor. Zwar ist ihre hohe Dichte ein besonderes Merkmal dieser Krankheit. Auch ist der Grad der Demenz umso höher, je mehr solche neurofibrillären Bündel abgelagert sind. Doch lange hielten Alzheimer-Forscher die andere Sorte von Ablagerungen, die „amyloiden Plaques“, für charakteristischer und wichtiger.

Nervenzellen, zwischen denen amyloide – oder „senile“ – Plaques liegen, wirken häufig aufgequollen und deformiert. Zudem sammeln sich um einen Ablagerungsherd gewöhnlich so genannte Mikroglia-Zellen. Diese sind Teil des Gehirn-Immunsystems und rufen Entzündungsreaktionen hervor. Möglicherweise versuchen die Mikroglia-Zellen, beschädigte Neuronen zu zerstören und fortzuräumen, vielleicht sogar die amyloiden Plaques selbst. Ob die Nervenzellen des Gehirns innerhalb oder in der Nähe der Ablagerungen noch normal arbeiten, ist nicht klar. Der Grad der Demenz korreliert nämlich nur schwach mit



CATHERINE BERGERON, UNIVERSITY OF TORONTO, UND ROBERT D. TERRY, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO

der Menge an Plaques. Zudem weisen auch sonst die meisten älteren Menschen solche Ablagerungen auf. Für Alzheimer-Patienten ist aber ihr massives Vorkommen gerade in Hippocampus und Großhirnrinde kennzeichnend. Und bezeichnenderweise erscheinen die Plaques bei Alzheimer viel früher als die neurofibrillären Bündel.

Deswegen erhofften sich viele Forscher jahrelang vorrangig von den amyloiden Plaques Aufschluss über die Alzheimer-Krankheit. Von der Untersuchung ihrer Entstehung und ihrer biochemischen Struktur versprachen sie sich Einblick in die Ursachen dieser Demenz. Mitte der achtziger Jahre erkannten Wissenschaftler als Hauptbestandteil der Plaques ein Peptid – ein recht kurzes Proteinbruchstück aus entweder 40 oder 42 Aminosäurebausteinen: das heute so genannte „β-Amyloidpeptid“ oder kurz „β-Amyloid“. Kurz darauf gelang es, das Gen für das größere Protein zu identifizieren, von dem jenes Bruchstück stammt. Dieses Protein wird als „β-Amyloid-Vorläuferprotein“ (nach der englischen Benennung kurz „βAPP“) bezeichnet. Erfreulicherweise passten diese Erkenntnisse gut zu Studien über die Vererbung von Alzheimer.

Der deutsche Neurologe und Psychiater Alois Alzheimer (1864–1915) beschrieb die nach ihm benannte Demenzkrankheit 1906 in einem Vortrag und veröffentlichte seine Befunde im Jahr darauf. Seitdem versuchen Epidemiologen herauszufinden, inwieweit der geistige Verfall erblich ist oder durch Umwelteinflüsse ausgelöst wird. Sie verfolgen seit den achtziger Jahren Befunde dazu, dass Alzheimer manchmal familiär gehäuft auftritt. In einigen Familien trägt die Veranlagung rund die Hälfte der Kinder, wenn ein Elternteil betroffen ist. Und zwar erkranken Söhne und Töchter im Mittel gleich oft. Daraus schlossen die Forscher: Der defekte Erbabschnitt liegt nicht auf einem der beiden Geschlechtschromosomen, sondern auf einem der anderen Chromosomen. Ferner scheint das defekte Gen dominant über das normale zu sein, das auf dem so genannten Geschwisterchromosom liegen müsste – denn dieses kann den Fehler offensichtlich nicht kompensieren.

Doch sucht die Alzheimer-Krankheit auch Personen heim, die nicht in dieser Weise familiär vorbelastet sind. Folglich muss es noch andere Ursachen als eine erbliche Veranlagung geben. Die Demenz kann demnach wohl in vielfältiger und komplexer Weise ausgelöst werden. Immerhin dürfte der genetische Hintergrund in vielen Fällen zumindest mitwirken – die Schätzungen schwanken zwischen einem und vierzig Prozent.

Früherer Ausbruch durch Umweltfaktoren?

Allerdings hat die Suche nach beteiligten oder allein verantwortlichen Umwelteinflüssen noch kaum Klarheit gebracht. Die wenigen bisher entdeckten äußeren Risikofaktoren sind zwar bemerkenswert, aber nicht wirklich aufschlussreich. Unter Verdacht stehen: Lerndeprivation in der frühen Kindheit, schwere Kopfverletzungen und auch, wenngleich weit weniger sicher, Aluminium im Trinkwasser. Doch Korrelation und Verursachung sind zweierlei. Vielleicht sind solche Befunde bloß eine Begleiterscheinung des wirklichen Zusammenhangs. Beispielsweise kann eine Kopfverletzung viele Nervenzellen im Gehirn zum Absterben bringen. Auf Grund dessen könnten sich die Alzheimer-Symptome einfach früher zeigen. Der Patient wäre sonst wohl auch erkrankt, nur eben viel später. Die Verletzung hätte dann die Demenz im Grunde nicht verursacht.

Die Entdeckung, dass Alzheimer erblich sein kann, war für die weitere Forschung wertvoll. Die Forscher konnten die genetischen Befunde nun gezielt in die biochemischen Studien einbinden. Sie wussten: Jede Erkenntnis hätte generellen Wert. Denn alle Alzheimer-Fälle – ob familiär bedingt oder „sporadisch“ auftretend, wie die Mediziner sagen – zeigen das gleiche klinische Bild und die gleichen neuropathologischen und biochemischen Anomalien. Bei jedem Patienten lagern sich in den Gehirnnervenzellen die vertrackten neurofi- ▶

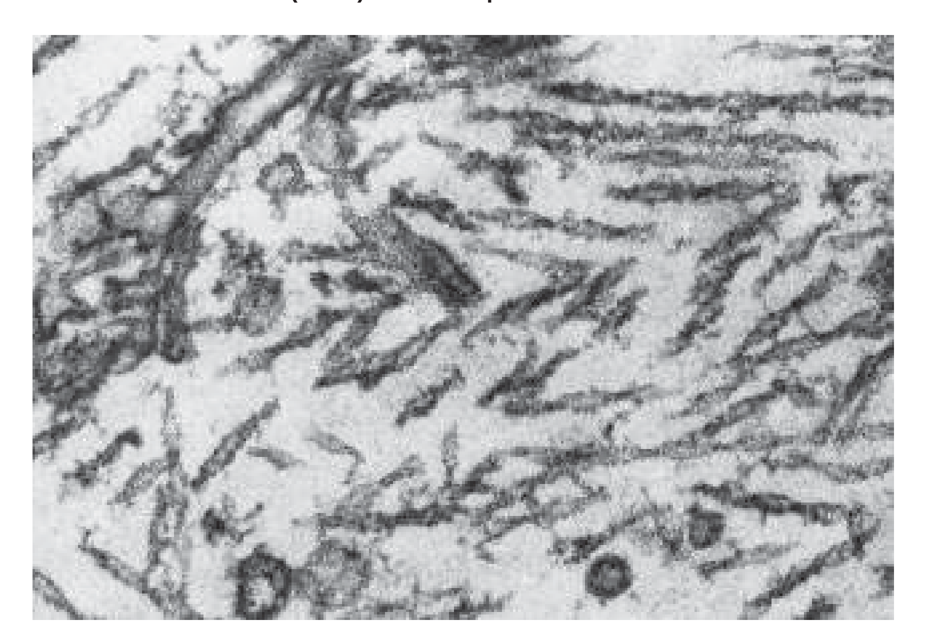
Literaturhinweise

Alzheimer. Das Leben eines Arztes und die Karriere einer Krankheit. Von Konrad und Ulrike Maurer. Piper, 2. Aufl. 1999.

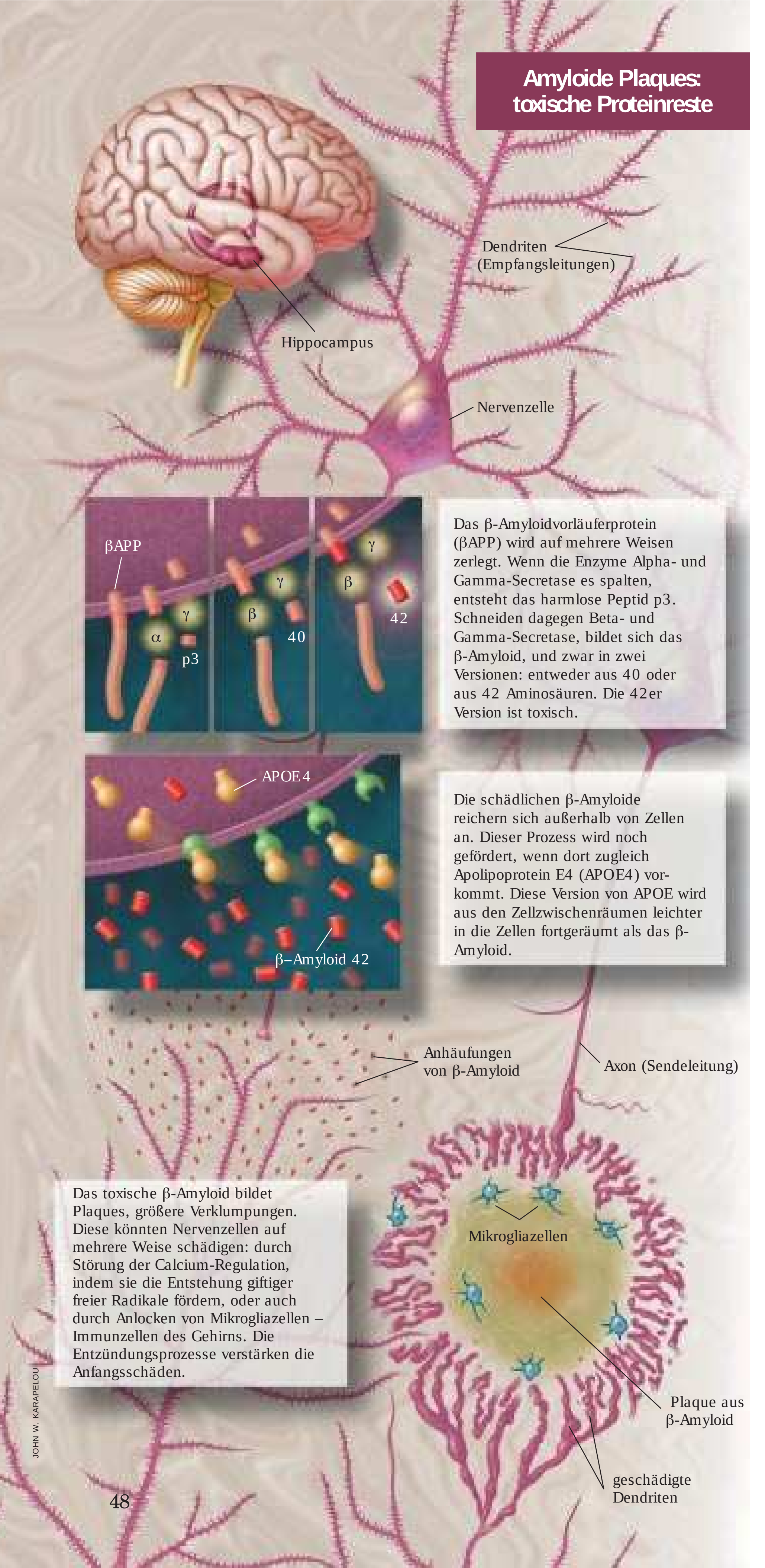
Alzheimer. Der lange Abschied. Von Hans Lüdicke. Karl F. Haug-Sachbuch im Trias-Verlag. Medizinverlage Heidelberg, 1999.

Handbuch der Betreuung und Pflege von Alzheimer-Patienten. Thieme-Verlag, 1999.

Auskunft, Beratung und Adressen (auch Ratgeber-Broschüren):
Die Deutsche Alzheimer Gesellschaft e.V., Friedrichstr. 236, 10969 Berlin, Tel. 030-31505733;
Alzheimer-Hilfe, PF 708 33, 60599 Frankfurt, Tel. 0180/33 666 33;
Weblinks unter: ***www.spektrum.de/aktuellesheft.html***



Neurofibrilläre Bündel aus „Tau-Protein“ (siehe Steckbrief) zeigen sich im Krankheitsverlauf erst spät. Ihre Masse korreliert mit dem geistigen Verfall. In dem linken Bild unter dem Lichtmikroskop erscheinen sie als schwarze, eckige Flecken. Unter dem Elektronenmikroskop (rechts) werden die paarweise verdrillten Tau-Fasern sichtbar.



brillären Bündel aus Tau-Protein ab und bilden sich zwischen den Zellen die Plaques aus β-Amyloid.

Bald nach der Isolation des β-Amyloids gelang der Nachweis, dass das Gen für sein Vorläuferprotein βAPP auf Chromosom 21 liegt. Gleichzeitig gab es Hinweise, dass in einigen Familien mit erblichem Alzheimer ein Defekt in genau diesem Chromosom auftritt. Außerdem war schon bekannt, das Menschen mit einem Down-Syndrom (früher Mongolismus genannt) – die ein überzähliges Chromosom 21 besitzen – um das vierzigste Lebensjahr herum fast unweigerlich zumindest einige Symptome der Alzheimer-Krankheit entwickeln.

Mutationen im Vorläuferprotein mit toxischen Folgen

War das Gen für das Amyloidvorläuferprotein in manchen Alzheimer-Fällen mutiert und dieses Protein deswegen verändert? Tatsächlich entdeckte eine Reihe von Forschern bei Patienten mit familiärer Häufung der Krankheit Anfang der neunziger Jahre solche Mutationen. Nun war klar: Eine abnorme Bearbeitung oder Aktivität des Vorläuferproteins βAPP ruft Alzheimer hervor. Irgendwie mussten sich die Mutationen auf die Entstehung des β-Amyloids auswirken. Wie wird dieses Peptid hergestellt?

Zwar ist die genaue biologische Funktion des normalen βAPP noch ungeklärt. Doch so viel weiß man: Das Protein ist zwischen 695 bis 770 Aminosäuren lang; und es kommt in vielen Zellen und Geweben vor. Es liegt so in der Außenmembran von Zellen, dass es sie durchquert. Ins Zellinnere ragt nur ein kurzes Stück, ein längeres reicht nach außen (Grafik links, oberer Einschub). Das β-Amyloidpeptid nun wird aus dem Protein dort herausgeschnitten, wo das Protein die Zellmembran durchzieht.

Das βAPP kann aber auf zwei Weisen zerlegt werden. In beiden Fällen werden nacheinander zwei Enzyme tätig, die allerdings noch nicht alle isoliert werden konnten. Entweder entsteht ein harmloses Peptidfragment namens p3: In diesem Fall sind Alpha-Secretase und Gamma-Secretase am Werk.

Problematisch ist der zweite Weg, weil auf ihm das β-Amyloid entsteht. Da trennt Beta-Secretase von dem Protein zunächst ein 99 Aminosäuren langes Spaltstück ab. Hiervon schneidet wiederum Gamma-Secretase das Amyloid ab. Beta-Secretase zu isolieren gelang bereits. Das Aussehen der anderen beiden Enzyme kennt man noch nicht.

Normalerweise bestehen die meisten β-Amyloide aus 40 Aminosäuren und sind harmlos. Manche jedoch – weniger als zehn Prozent – haben zwei Bausteine mehr, also 42. Eben dieses Fragment aus 42 Aminosäuren kann offenbar Probleme machen. Denn wie sich herausstellte, entstehen die amyloiden Plaques im Gehirn der Alzheimer-Kranken gerade aus diesem etwas längeren Bruchstück (Grafik links, oberes Einschubbild). Es zeigte sich auch, dass dieses Fragment auf Nervenzellen direkt toxisch wirkt.

Wie schädigt dieses Molekül die Neuronen? Nach den bisherigen Forschungsbefunden kommt dabei mehreres zusammen. Erstens scheint das Peptid den Calcium-Haushalt von Zellen so stark zu stören, dass dies für sie oft tödlich ausgeht. Zweitens könnte das Fragment die Stätten der Zellatmung, die Mitochondrien, derart schädigen, dass sich hochreaktive und giftige Sauerstoffradikale übermäßig ausbreiten und lebenswichtige Zellbestandteile angreifen, unter anderem Proteine und die DNA. Und schließlich scheinen die durch das Peptid geschädigten Zellen Stoffe freisetzen, die Immunzellen anziehen und eine Entzündungsreaktion auslösen.

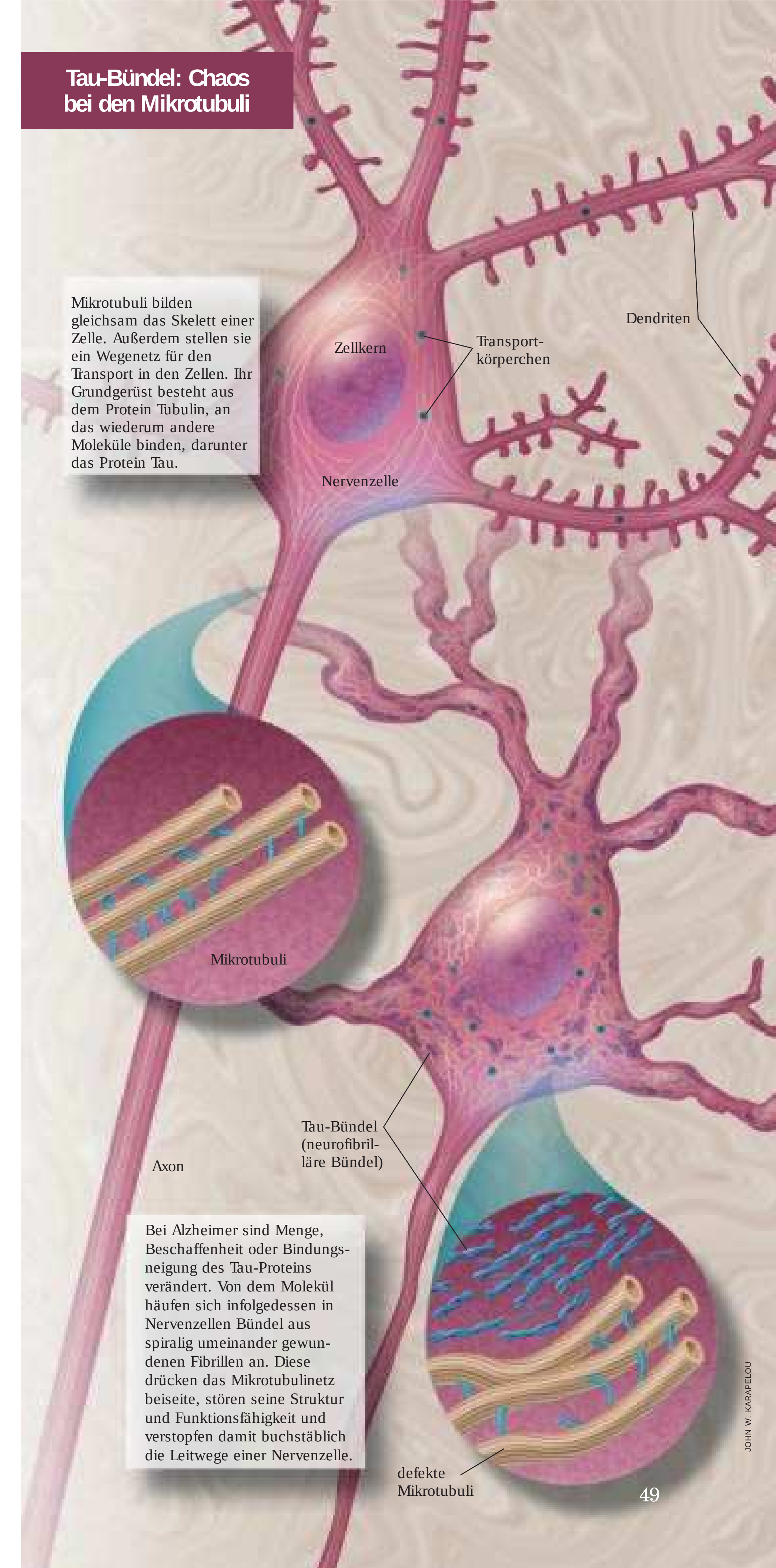
Dies alles könnte sich gegenseitig aufschaukeln und zu dem Teufelskreis führen, an dessen Ende die Nervenzellen zu Grunde gehen. Der Stellenwert solcher Vorgänge bei Alzheimer ist aber noch strittig.

Überproduktion von gefährlichen Proteinfragmenten

Auch die genetischen Studien machten Fortschritte. Die Genetiker fanden im Gen von βAPP mehrere Mutationen, auf Grund derer das Protein genau dort andere Aminosäuren trägt, wo die drei Secretasen das Molekül spalten. Sie entdeckten auch, dass infolgedessen die beiden 40 und 42 Aminosäuren langen β-Amyloide vermehrt entstehen oder das toxische längere Fragment übernormal häufig produziert wird. Dies war nicht verwunderlich.

Doch vielleicht konnten auch Enzyme fehlerhaft arbeiten oder fehlen, die normalerweise βAPP zerlegen oder bei dem Prozess mitwirken. So suchten die Forscher auch nach Mutationen an den Genen solcher Moleküle. 1995 isolierten meine Mitarbeiter und ich zwei Gene, die wir *Präsenilin 1* und *2* tauften. Mutationen in diesen Genen verursachen eine Alzheimer-Form, die in relativ frühem Alter beginnt und sehr aggressiv verläuft. (An einer früh einsetzenden Form erkranken in Familien mit gehäuftem, ▶

Tau-Bündel: Chaos bei den Mikrotubuli



Mikrotubuli bilden gleichsam das Skelett einer Zelle. Außerdem stellen sie ein Wegenetz für den Transport in den Zellen. Ihr Grundgerüst besteht aus dem Protein Tubulin, an das wiederum andere Moleküle binden, darunter das Protein Tau.

Bei Alzheimer sind Menge, Beschaffenheit oder Bindungsneigung des Tau-Proteins verändert. Von dem Molekül häufen sich infolgedessen in Nervenzellen Bündel aus spiralig umeinander gewundenen Fibrillen an. Diese drücken das Mikrotubulinetz beiseite, stören seine Struktur und Funktionsfähigkeit und verstopfen damit buchstäblich die Leitwege einer Nervenzelle.

erblichem Alzheimer zehn bis sechzig Prozent der Patienten.)

Diese beiden Gene sitzen auf den Chromosomen 14 beziehungsweise 1. Sie codieren Proteine, die mehrfach die Zellmembran durchziehen und eine komplizierte Reifung durchmachen. Dabei entsteht ein größerer Komplex, der die Aufgabe hat, andere membrangebundene Proteine zu zerschneiden oder dabei zu helfen. Zu ihnen gehört βAPP.

Bei bestimmten künstlichen Mutationen in den *Präsenilin*-Genen bei Mäusen scheint die Aktivität dieser enzymatischen Komplexe gestört zu sein. Dies erwiesen verschiedene Studien. Wenn Mäusen wegen solch einer Mutation das Präsenilin-1-Protein fehlt, entsteht unter anderem auch kein β-Amyloid. Der zweite Spaltungsschritt von βAPP – durch Gamma-Secretase – findet dann nicht statt.

Gerade das Gegenteil geschieht bei Alzheimer-Patienten aus erblich belasteten Familien, wenn sie mutierte *Präsenilin*-Gene besitzen: Diese Mutanten bewirken eine Steigerung der Schnittrate durch Gamma-Secretase. Dadurch entsteht β-Amyloid im Übermaß, und zwar tritt besonders viel von dem längeren Peptid aus 42 Aminosäuren auf. Noch wissen wir es nicht genau, aber vielleicht werden sich die Präseniline als die gesuchte Gamma-Secretase entpuppen. Oder sie helfen der Secretase irgendwie. Beispielsweise könnten sie das Enzym aktivieren oder es mit βAPP in Kontakt bringen.

So schwerwiegend Mutationen der *Präsenilin*-Gene und des Gens für βAPP sich auswirken: Sie zeichnen nur für jeden zweiten Fall von frühzeitig ausbrechendem familiär gehäuftem Alzheimer verantwortlich. Somit betrifft dies insgesamt höchstens jeden zwanzigsten Fall.

Ein anderes schadhaftes Gen tritt bei der Krankheit deutlich häufiger auf. Dieses Gen scheint oft bei Menschen vorzukommen, die erst im Alter an Alzheimer erkranken, was für diese Demenz ja typischer ist. 1993 entstand der Verdacht, dass dieses Gen auf Chromosom 19 liegt. Das Protein, das Forscher isolierten, heißt „Apolipoprotein E“, kurz „APO E“.

Irrtum beim „Saubermachen“

Das Gen für dieses Protein existiert in drei Versionen oder Allelen. Eine der drei Varianten – *APO E4* – verdächtigen Wissenschaftler auch als eine Ursache von Alzheimer. Diese Version des Gens erscheint bei der Krankheit auffallend oft, einer Studie zufolge bei knapp 40 Prozent der Betroffenen. Normalerweise kommt dieses Allel in der Bevölkerung seltener vor.

Wie könnte das von diesem Gen codierte Protein Alzheimer heraufbeschwören? Eine von mehreren Möglichkeiten wäre, dass diese Variante mit dem β-Amyloid darum konkurriert, aus dem Zellzwischenraum in Zellen abtransportiert zu werden (Bild Seite 48, unteres Einschubbild). Zumindest schafft ein bestimmtes für solche Räumdienste zuständiges Molekül dieses Protein deutlich effektiver fort als das β-Amyloid. Damit reichert sich Letzteres draußen an und könnte Unheil anrichten. Für diese These spricht, dass Alzheimer-Kranke, die diese Genvariante aufweisen, mehr β-Amyloid-Ablagerungen bilden als Patienten, die diese Version nicht haben. Bemerkenswert ist auch, dass Alzheimer sehr viel früher auftritt, wenn jemand neben einer Mutation im βAPP-Gen die verdächtige Variante besitzt.

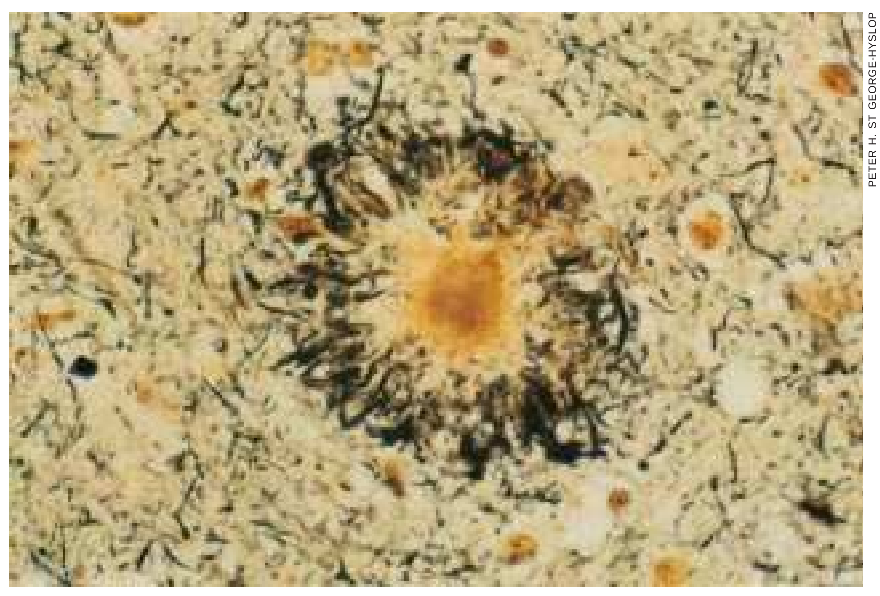
All dies klärt aber noch längst nicht die Entstehung von Alzheimer. Unstrittig ist heute zwar, dass ein abnormer Umgang mit dem Protein βAPP und seinem Peptidfragment β-Amyloid zu den Ursachen gehört. Doch für ein komplettes Bild fehlt noch so mancher wichtige Einblick. Zum Beispiel setzen die Unregelmäßigkeiten mit der Spaltung von βAPP und die Anhäufung des β-Amyloids ja bereits früh ein. Doch was geschieht dann? Vor allem: Wieso bezeichnet die Dichte der Plaques aus Amyloid nicht den Grad an Demenz? Die wichtigste Frage heißt darum: Erzeugen die Plaques selbst überhaupt die Verluste an Gehirnsubstanz?

Diese Frage beschäftigt die Alzheimer-Forscher seit Jahren. Meine Ansicht: Anomalien mit βAPP und dem β-Amyloid lösen eine Ereigniskette aus, an deren Ende schließlich Nervenzellen beschädigt und zerstört werden. Und das führt dann zu dem geistigen Verfall. Zu den späteren schädlichen Vorgängen in der Ereigniskette könnte gehören, dass die neurofibrillären Bündel auftreten, die sich in den Nervenzellen bildenden Cluster aus Tau-Protein.

Noch vor kurzem galten die abnormen, paarweise verflochtenen Tau-Proteinfilamente als eine eher harmlose Begleiterscheinung der Alzheimer-Krankheit. Erst das Studium einer anderen Form von geistigem Abbau, der seltenen Pickschen (frontotemporalen) Demenz, weckte hieran Zweifel. Auch einige dieser Patienten weisen Tau-Ablagerungen auf. Und auch diese Demenz tritt mitunter familiär gehäuft auf und scheint unter anderem auf erblichen Gendefekten zu beruhen.

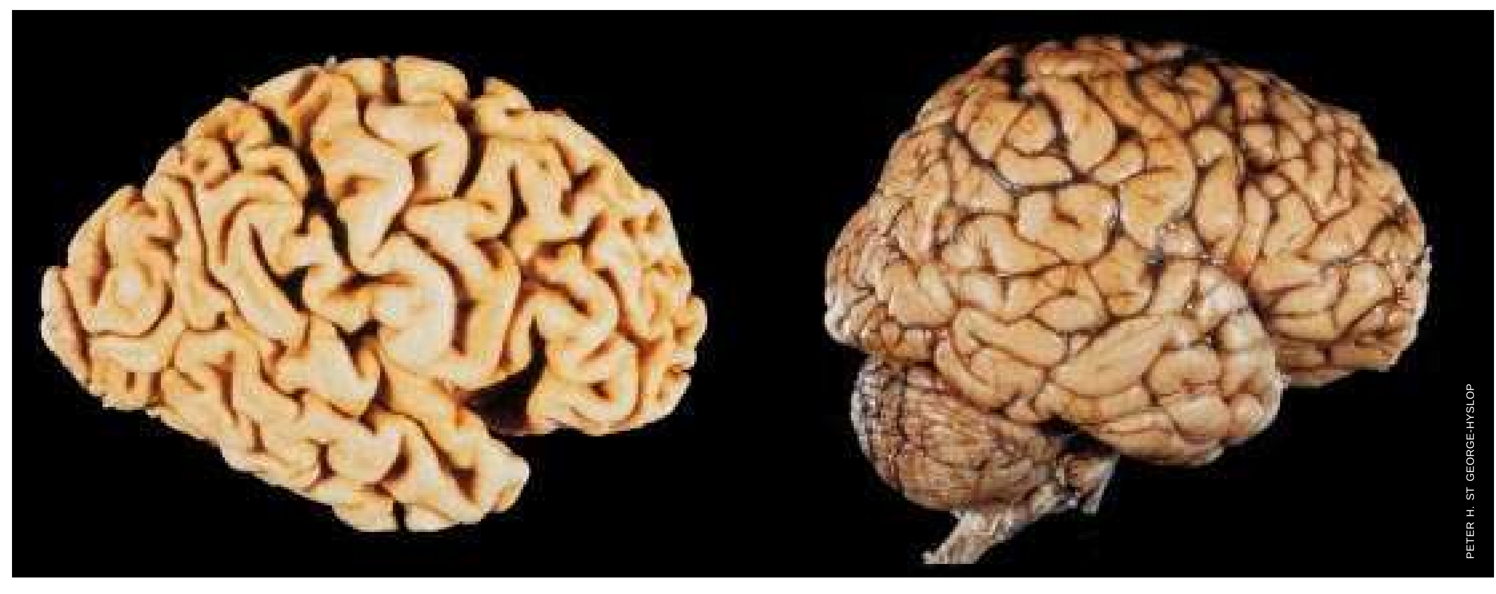
Ein verdächtiges Gen liegt offenbar auf Chromosom 17, das auch das Gen für Tau trägt. In einer Studie von 1998 besaßen solche Patienten mit frontotemporaler Demenz, in deren Gehirnen Tau-Bündel auftraten, tatsächlich eine Mutation im Gen für Tau. Das spricht dafür, dass eine Demenz direkt auf einem Fehlverhalten dieses Proteins beruhen kann.

Dieser Befund lässt auch für Alzheimer annehmen, dass die neurofibrillären Bündel ebenfalls in einem ursächlichen Zusammenhang mit der Krankheit ste-



PETER H. ST GEORGE-HYSLOP

Eine amyloide Plaque, umgeben von Tau-Ablagerungen. Dieses Bild bietet sich in späten Alzheimer-Stadien. Der Amyloidkern der Plaque ist orangebraun gefärbt. Der ihn umschließende Ring besteht aus Nervenzellendigungen, in denen die – schwarz erscheinenden – Tau-Filamente liegen. Die kleinen braunen Gebilde dazwischen sind Entzündungszellen des Gehirns.



Der Schwund von Hirngewebe kann bei Alzheimer beträchtlich sein. Das Gehirn eines an der Demenz erkrankten Menschen (links) lässt sogar erkennen, dass die Furchung der äußeren Hirnrinde schwindet. Rechts das Gehirn einer gleichalten Person ohne Alzheimer.

hen. Das würde erklären, wieso die Bündel umso dichter erscheinen, je schwerer die Demenz ist. Das nämlich registrierten Wissenschaftler schon vor zehn Jahren. Wie die Picksche Demenz auf Grund der Mutationen im Gen für Tau entsteht, wissen wir zwar noch nicht genau. Es sieht aber tatsächlich so aus, als würde bei den Mikrotubuli Verheerung angerichtet (Bild Seite 49).

Wegen seines fehlerhaften Gens bindet sich das Tau-Protein möglicherweise nicht ordnungsgemäß an Tubulin, den Grundbaustein der Mikrotubuli. Oder die einzelnen Tau-Sorten entstehen nicht im richtigen Mengenverhältnis. In beiden Fällen würden zu viele freie Tau-Proteinfilamente auftreten. Und die überschüssigen Moleküle drillen sich dann paarweise umeinander, statt sich an Tubulin zu binden. Die Mikrotubuli könnten ihre Funktionen nicht mehr richtig erfüllen, und die zunehmende Masse der Tau-Bündel würde zelluläre Transportmechanismen gleichsam abwürgen. Folglich bekämen betroffene Nervenzellen Schwierigkeiten, ihre Sendedrähte (die Axone) und Empfangsdrähte (die Dendriten) zu versorgen.

So lässt sich eine mögliche Ursachenkette für die Alzheimer-Krankheit konstruieren: Abweichungen bei βAPP und dem β-Amyloid setzen eine Folge molekularer Ereignisse in Gang. Manche davon greifen Nervenzellen gleich direkt an. Andere verändern das Verhalten des Tau-Proteins und schädigen die Neuronen so noch mehr. Das bewirkt dann die Demenz.

Über die Hintergründe von Alzheimer wissen wir heute viel mehr als noch vor zehn Jahren. Diesen Fortschritt verdanken wir zahlreichen Studien der verschiedensten Fachrichtungen. Viele Biochemiker, Molekularmediziner, Genetiker, Epidemiologen und Ärzte waren daran beteiligt. Die Aussicht auf effektive Therapien rückt immer näher. Einerseits werden hierzu wahrscheinlich die neueren Erkenntnisse über das Tau-Protein beitragen. Andererseits beflügeln schon heute Einsichten in das Verhalten von βAPP und des β-Amyloids die Therapieforschung.

Impfung gegen Plaques?

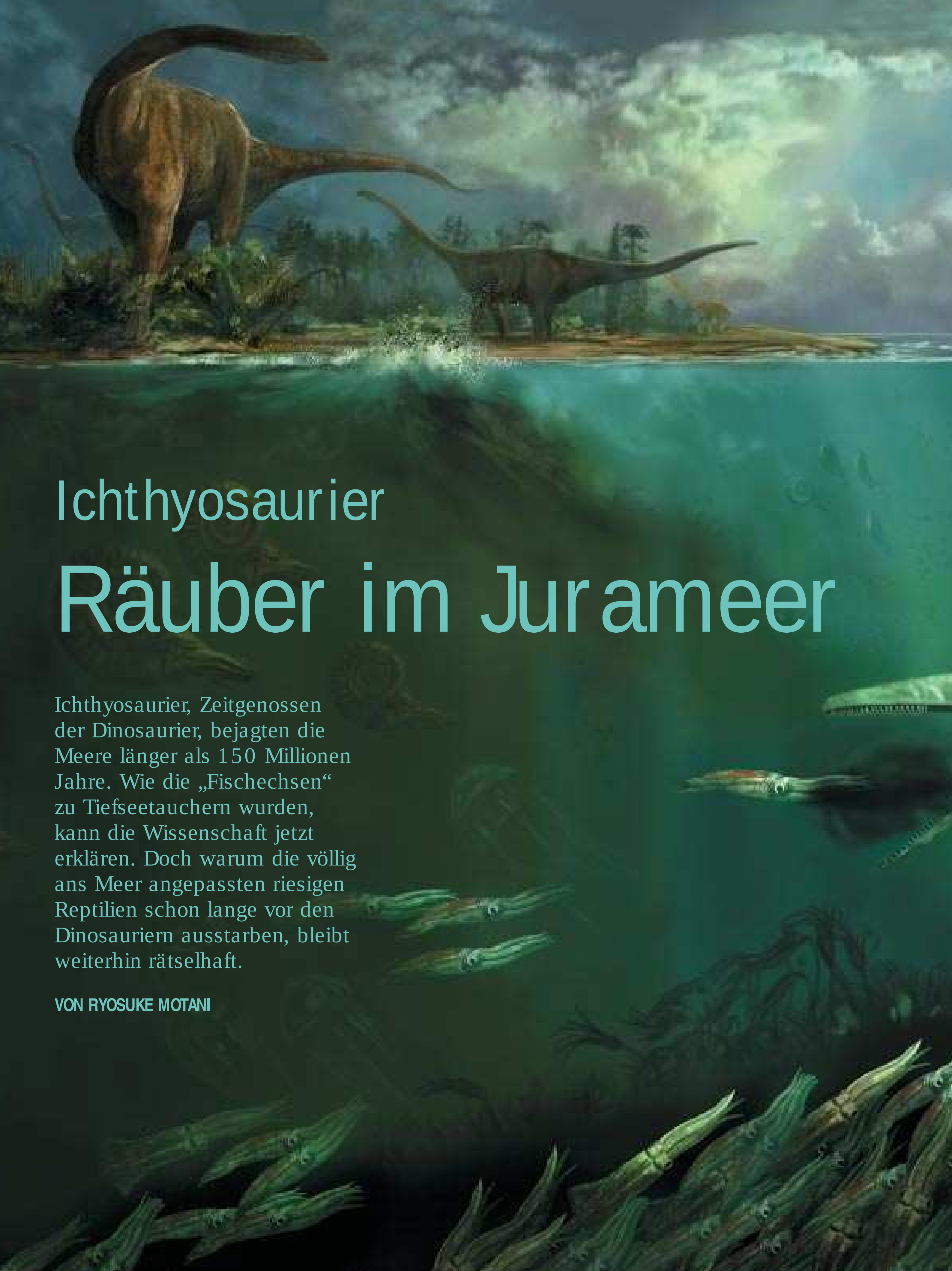
So gibt es Ansätze, Wirkstoffe maßzuschneidern, welche die Beta- oder die Gamma-Secretase daran hindern sollen, βAPP zu spalten. Das verheerende Amyloid würde dann gar nicht erst entstehen. Andere Forscher wollen Wege finden, die Auswirkungen des einmal vorhandenen zerstörerischen Peptids abzuschwächen. Auch sind schon klinische Studien mit Antioxidantien und Radikalfängern wie Vitamin E und nichtsteroidalen Entzündungshemmern wie Ibuprofen in Gang. Möglicherweise können solche Stoffe manche der toxischen Effekte des β-Amyloids abschwächen.

Mehrere Wissenschaftler suchen nach Möglichkeiten, den Prozess der Plaques-Bildung zu stören oder bereits existierende Cluster von innen her aufzulockern, wenn nicht gar aufzulösen. Das sollen Substanzen leisten, die sich in die Plaques einlagern können oder sogar welche, die offenbar an der Klumpenbildung des β-Amyloids beteiligt sind.

Schlagzeilen machen in letzter Zeit Tierexperimente, mit denen die Wissenschaftler herausfinden wollen, ob eine Impfung gegen Alzheimer möglich wäre. Sie impfen so genannte „Alzheimer“-Mäuse mit Impfstoffen auf Basis des β-Amyloids. Diese speziell gezüchteten Mäusestämme entwickeln zwar nicht alle Symptome der Demenz wie Menschen. Aber in ihrem Gehirn entstehen Amyloid-Cluster, und manche Stämme sind auch in ihrer Lernfähigkeit beeinträchtigt. Wie die Forscher zeigen konnten, bilden sich nach einer Impfung solche Ablagerungen erst gar nicht, und nachträglich scheint das trainierte Immunsystem sie sogar wieder zu zerstören. Mehr noch: Geimpfte Mäuse verlieren nicht ihr Lernvermögen. Und Tiere mit schon geschwächtem Gedächtnis lernten nach einiger Zeit wieder so gut wie gesunde Artgenossen. Man darf gespannt sein, ob sich Menschen mit Alzheimer-Demenz in absehbarer Zeit gegen ihre Krankheit werden impfen lassen können.

Was auch immer die Zukunft an Therapien bereithalten mag – die Vielzahl der Ansatzpunkte, denen Wissenschaftler jetzt nachgehen, stimmt hoffnungsvoll. So komplex der Entstehungsprozess von Alzheimer auch sein mag: Die Krankheit ist längst nicht mehr völlig rätselhaft. Wir wissen bereits vieles über die einzelnen Stadien und die biochemischen Hintergründe. Und jedes weitere Puzzleteilchen macht das Bild schärfer und ermöglicht noch gezieltere Forschungen. ■

Peter H. St George-Hyslop *ist Neurologe und Molekulargenetiker. Er leitet das Forschungszentrum für neurodegenerative Erkrankungen an der Universität Toronto und die Klinik für Gedächtnisstörungen am Toronto Western Hospital.*

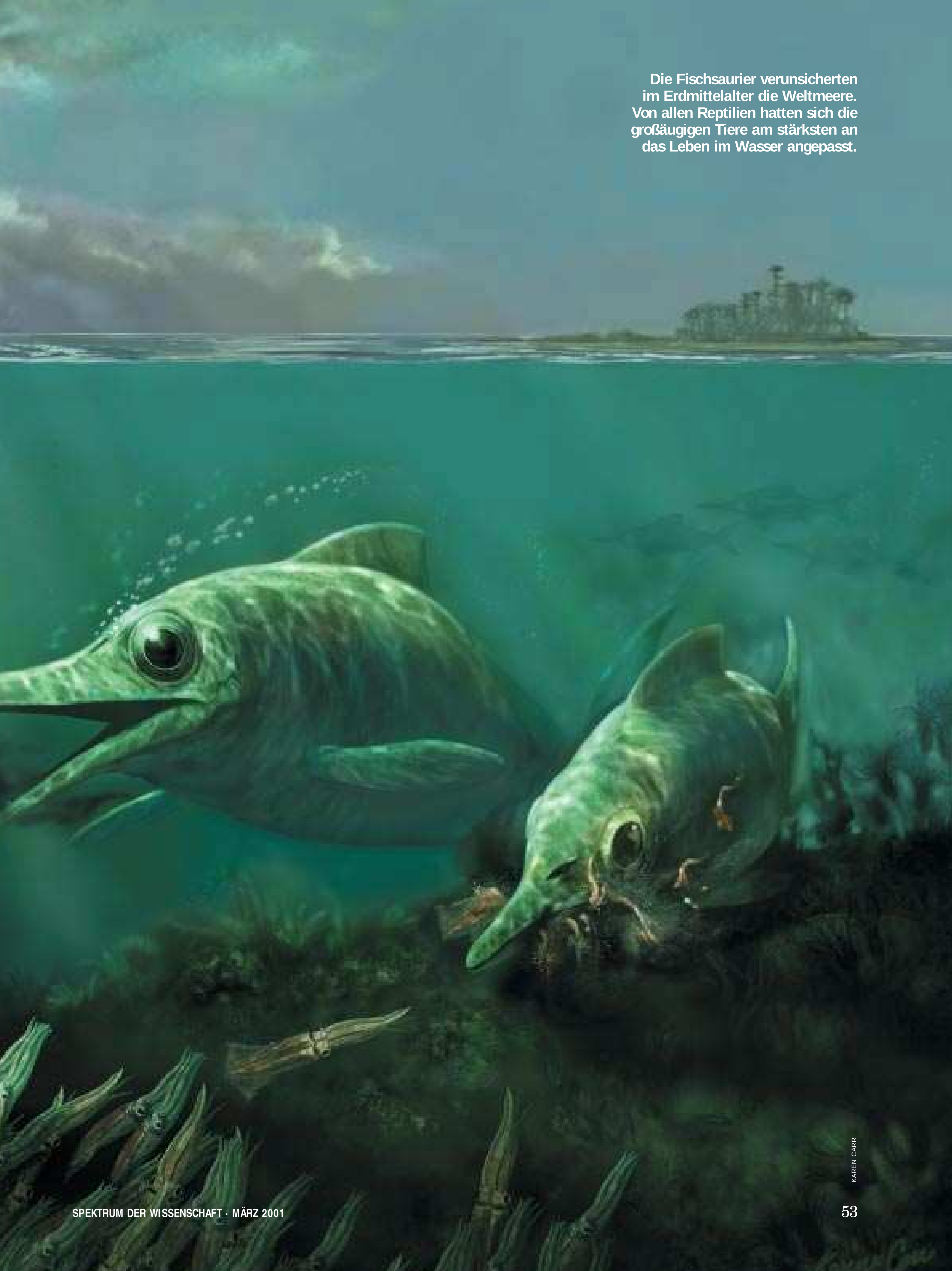


Ichthyosaurier

Räuber im Jurameer

Ichthyosaurier, Zeitgenossen der Dinosaurier, bejagten die Meere länger als 150 Millionen Jahre. Wie die „Fischechsen“ zu Tiefseetauchern wurden, kann die Wissenschaft jetzt erklären. Doch warum die völlig ans Meer angepassten riesigen Reptilien schon lange vor den Dinosauriern ausstarben, bleibt weiterhin rätselhaft.

VON RYOSUKE MOTANI



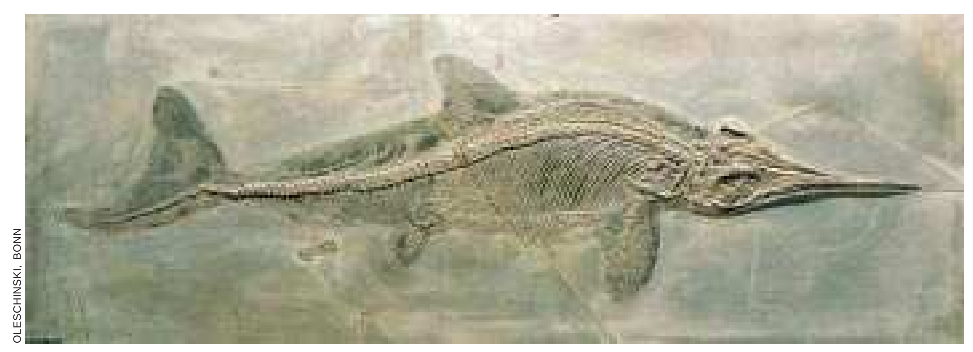
Die Fischsaurier verunsicherten im Erdmittelalter die Weltmeere. Von allen Reptilien hatten sich die großäugigen Tiere am stärksten an das Leben im Wasser angepasst.

KAREN CARR

Würde heute ein großer Fischsaurier mitten auf dem Ozean auftauchen, um nach Luft zu schnappen, hielten wir ihn sicherlich für einen kleinen Wal. Besonders den Delfinen ähnelten manche Arten verblüffend sowohl im Körperumriss als auch mit ihrer langen, spitzen Schnauze. Viele von ihnen jagten wie einige Wale heute in der Tiefsee. Damals waren Wale noch nicht entstanden.

Zur Zeit der Dinosaurier verunsicherten noch andere ungeheure Reptilien die Ozeane. Doch die Ichthyosaurier – die Fischsaurier oder Fischechsen – hatten als Einzige die typische Fischform ausgebildet: einen stromlinienförmigen Körper mit Flossen und einem sichelförmigen Schwanz, mit dem sie sich beim Schwimmen antrieben. Die Fischechsen lebten denn auch ausschließlich im Wasser. Dort brachten sie ihre Jungen lebend zur Welt, denn sie konnten zur Eiablage nicht mehr das Land aufsuchen wie etwa heute Meeresschildkröten. Die deutsche Bezeichnung für Reptilien, „Kriechtiere“, passt auf sie darum eigentlich nicht mehr recht. Erst vor wenigen Jahren vermochten wir anhand von neuen Fossilien aus der Frühzeit der Fischechsen diese Anpassungen ans offene Meer zu klären.

Die Ichthyosaurier erlebten ihre Blüte im Jura, der mittleren Formation des Erdmittelalters, das von vor rund 250 bis 65 Millionen Jahren dauerte. Bisher fanden den Paläontologen Fossilien von gut achtzig Fischsaurier-Arten. Die größten dieser marinen Reptilien erreichten über fünfzehn Meter Länge. Zu den Riesen gehört die „Schneidezahnechse“, wissenschaftlich als *Temnodontosaurus* bezeichnet. Diese Monster verschlangen sogar große Wirbeltiere. *Ophthalmosaurus*, ein mittlerer Vertreter, maß immerhin fast vier Meter. Er verköstigte sich wohl hauptsächlich mit Tintenfischen. Doch gab es auch kleinere Ichthyosaurier, die kaum einen Meter lang wuchsen.

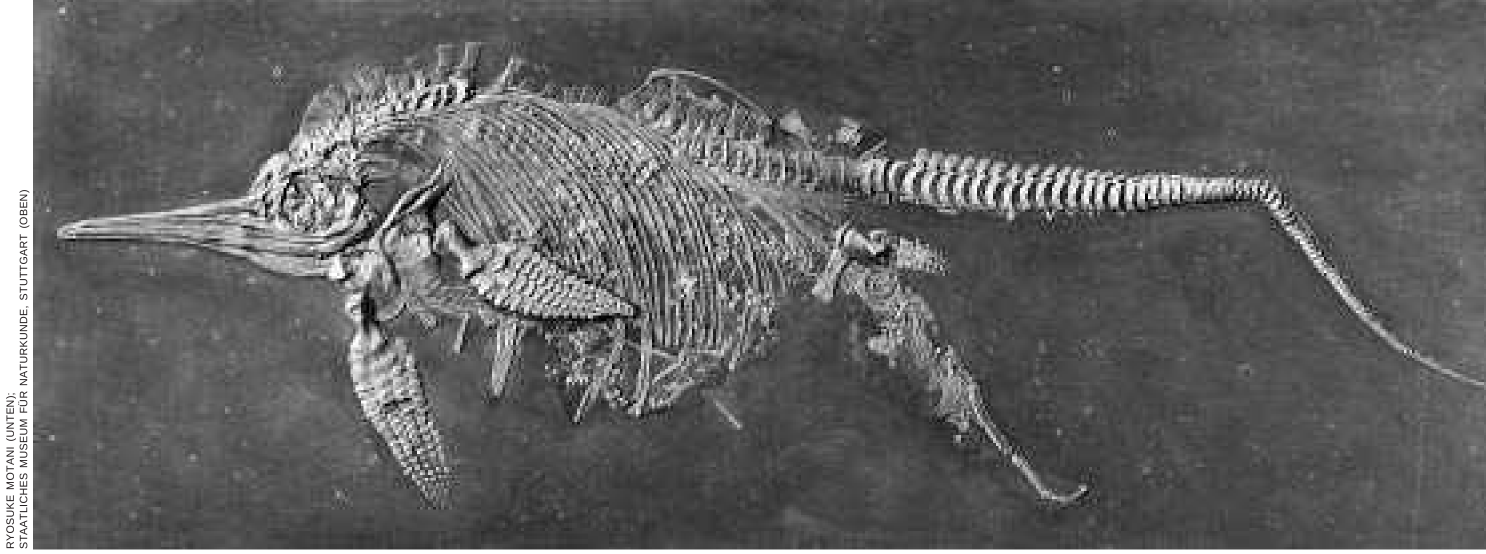

OLESCHINSKI, BONN

Dieses „Hautexemplar“ eines *Stenopterygius* stammt aus Holzmaden.

Auf die ersten Fossilien dieser einmaligen Tiergruppe wurden Forscher vor rund zweihundert Jahren aufmerksam. Dinosaurier, die größten Kriechtiere aller Zeiten, waren damals noch unbekannt. Umso mehr Aufsehen und Irritation erregten die merkwürdigen „Riesenfische“ mit ihren ungewöhnlich großen Augen und der auffällig dicken Wirbelsäule aus vielen flachen, scheibenförmigen, in der Mitte eingewölbten Wirbeln. Den Wissenschaftlern war anfangs völlig unklar, welcher Tierklasse sie diese Kolosse zuordnen sollten. Sie erkannten am Bau des Skeletts, dass sich die vorsintflutlichen Kreaturen offenbar im Wasser aufgehalten hatten. Andererseits erinnerte manches an ihrer Anatomie an landlebende Wirbeltiere. Einige Forscher hielten sie trotzdem zunächst für Fische. Andere sahen in ihnen Amphibien, stellten sie also in die Verwandtschaft von Fröschen und Lurchen – die ja auch noch eng ans Wasser gebunden leben. Manche Paläontologen klassifizierten die abstrusen Wesen sogar als meereslebende Säugetiere.

Nach neueren Befunden gehören die Fischsaurier zu den „diapsiden“ Reptilien. Wahrscheinlich spalteten sie sich von anderen Kriechtieren ungefähr dort ab, wo sich auch die Äste der Archosaurier und Lepidosaurier voneinander trennten. Ob die Fischsaurier etwas früher oder etwas später abzweigten, weiß man noch nicht.

TOMO NARASHIMA UND CLEO VILETT



RYOSUKE MOTANI (UNTEN); STAATLICHES MUSEUM FÜR NATURKUNDE, STUTTGART (OBEN)



Frühe Fischsaurier (links) ähnelten noch kleinen Echsen: Das schlanke Skelett aus China stammt von einem *Chaohusaurus*. Erst später in ihrer Evolution nahmen die Ichthyosaurier Fischgestalt an. Zu den berühmtesten Vertretern gehört *Stenopterygius*; das oben gezeigte Exemplar aus Holzmaden befindet sich im Naturkundemuseum Stuttgart. Es handelte sich um ein Weibchen. Ein Jungtier, das gerade aus dem Geburtskanal austritt, ist deutlich zu erkennen.

Als dann in den dreißiger Jahren des neunzehnten Jahrhunderts die ersten Dinosaurierknochen ans Licht kamen und die Paläontologen sich fünf Meter hohen Skeletten von aufrecht gehenden Iguanodons gegenübersahen, verblasste das Interesse an den Ichthyosauriern etwas. Lange gingen die Forschungen nur schleppend voran. Die Wissenschaftler kamen aber schließlich überein, dass diese fischförmigen Wesen unzweifelhaft Reptilien darstellten. Denn ihre Schädel und Kiefer wiesen eindeutig Merkmale von Kriechtieren auf. Außerdem hatten die Ungetüme keine Kiemen besessen. Vielmehr atmeten sie anscheinend mit Lungen, also Luft, und konnten demnach keine Fische gewesen sein. Als überzeugenden Hinweis auf landlebende Vorfahren werteten die Forscher außerdem die zwei Paar Gliedmaßen.

Von welchen Reptilien die Fischsaurier abstammten, war aber zunächst schwer zu erkennen und bis vor kurzem noch umstritten. Wegen der extremen Anpassungen an das Leben im Meer hatten sie bestimmte anatomische Merkmale verloren, an denen man ihre nähere Verwandtschaft hätte ablesen können – wie typische Knochen im Hand- oder Fußgelenk. Völlig rätselhaft war auch, wie aus stämmigen Beinen Flossen geworden waren und wie sich die knochenlose obere Schwanzfluke und die Rückenfinne der Hochseesaurier entwickelt hatten.

Immer wieder tauchten an verschiedensten Orten weltweit Skelette und Knochenreste von Fischechsen auf. Zu den reichsten Fundstätten gehört der Ölschiefer bei Holzmaden in der Schwäbischen Alp. Die Fossilien sind oft vorzüglich erhalten. Einige lassen sogar noch den Körperumriss mit den Flossen erkennen. Inzwischen ist klar, dass diese Meeresungeheuer im Erdmittelalter über 150 Millionen Jahre lang existiert hatten. Vor 245 Millionen Jahren waren die ersten Fischechsen aufgetaucht, vor 90 Millionen Jahren waren die letzten verschwunden, mehr als 25 Millionen vor dem Ende der Dinosaurier. Viele von ihnen waren weit verbreitet. Anscheinend wanderten sie auch über weite Entfernungen, ähnlich wie heute die Wale.

Trotz allem blieb der Ursprung der Ichthyosaurier lange im Dunkeln. Bis ins zwanzigste Jahrhundert hinein entdeckten die Paläontologen nur Fossilien von den hoch entwickelten, bereits sehr typisch fischähnlichen Arten, die schon völlig an ein Leben im offenen Meer angepasst waren. Sie kannten aber nicht deren Vorfahren. Erst 1927 stießen sie auf einige Knochenfragmente von anscheinend urtümlichen Fischsauriern. Allerdings genügten die spärlichen Fossilien aus der Frühzeit dieser Reptiliengruppe lange nicht, um ihre nähere Verwandtschaft mit anderen Reptilien zu rekonstruieren. Die Forscher konnten darum lange nur rätseln, dass die ersten Ichthyosaurier wohl so ausgesehen hatten wie Eidechsen mit Flossen.

Vergleiche und neue Untersuchungsmethoden halfen aber, die Herkunft der Fischsaurier schließlich enger einzugrenzen. Manche Forscher vermuteten wegen bestimmter Schädelmerkmale, dass die Fischechsen zu den „Diapsiden“ gehörten, der großen Gruppe, die von den heutigen Reptilien unter anderem Schlangen, Echsen und Krokodile umfasst – alle lebenden Reptilien außer den Schildkröten –, und früher auch die Dinosaurier. (Der Name „Diapsiden“ leitet sich von zwei Paar Schläfenfenstern im Schädel her, einem charakteristischen Merkmal dieser Gruppe.) Befunde von neueren Skeletten bestärken diese Ansicht. Nur – mit welchen anderen Diapsiden wa-

Literaturhinweise

Fischsaurier – Einmal Landleben und zurück. Von P. Martin Sander. In: Spitzenleistungen. Unglaubliches aus dem Tierreich. Von Udo Gansloßer (Hrsg.), Filander Verlag, Fürth 1999.

Large Eyeballs in Diving Ichthyosaurs. Von R. Motani et al. in: Nature Bd. 402, S. 747, 16. Dez. 1999.

Ichthyosaurian Relationships Illuminated by New Primitive Skeletons from Japan. Von R. Motani et al. in: Nature, Bd. 393, S. 255. 21. Mai 1998.

Eel-like Swimming in the Earliest Ichthyosaurs. Von R. Motani et al. in: Nature, Bd. 382, S. 347, 25. Juli 1996.

ren die Ichthyosaurier am nächsten verwandt? Wann hatten ihre Vorfahren sich von anderen Diapsiden abgespalten?

In dieser Frage brachten uns jetzt die Skelette weiter, die Kollegen in Asien in den letzten Jahren freilegten – Zeugnisse von den bisher frühesten Fischsauriern. Der eine sensationelle Fund stammt aus Japan. An den Küsten im Nordosten der japanischen Hauptinsel Honshu steht schwarzer Schiefer an, der nicht nur die kostbare Tinte für Kalligrafien liefert, sondern an manchen Stellen auch Knochen des ältesten bekannten Ichthyosauriers birgt. Die Paläontologen nennen dieses Reptil *Utatsusaurus*. Bisher waren pro Fundstelle von einem Exemplar jeweils nur wenige Knochenbruchstücke aufgetaucht. Doch 1982 gruben Geologen von der Hokkaido-Universität in Sapporon zwei fast vollständige *Utatsusaurus*-Skelette aus. Dass wir sie nun untersuchen können, verdanken wir Nachio Minoura und seinen Kollegen.

Fast fünfzehn Jahre brauchten sie, um das umgebende Gestein von den äußerst brüchigen Knochen zu entfernen. Meistens arbeiteten sie dabei unter dem Mikroskop mit feinen Karbid-Nadeln. 1995, als die Präparationen fast abgeschlossen waren, lud Minoura mich ein, an der Untersuchung dieser Skelette teilzunehmen. Dann kam für mich der spannende Augenblick: Gleich als ich die Fossilien zum ersten Mal sah, wusste ich, dass *Utatsusaurus* genau unseren Erwartungen entsprach. Dies war wirklich eine Eidechse mit Flossen.

Die zweite Sensation durfte ich später im selben Jahr in Augenschein nehmen. Diesmal zeigte mir You Hailu, der damals in Peking am Institut für Wirbeltierpaläontologie und Paläoanthropologie arbeitete, das neu entdeckte Fossil eines *Chaohusaurus*. Es ist das bisher vollständigste Skelett dieser Gattung. Auch hierbei handelt es sich um einen frühen Ichthyosaurier, der in Gesteinsschichten gleichen Alters auftritt wie *Utatsusaurus*. An dem Präparat kann man zum ersten Mal die Körperform des Tiers erahnen. Dies waren tatsächlich Saurier von schlankem, eidechsenähnlichem Wuchs.

Anhand dieser Skelette konnten wir endlich die Verwandtschaft innerhalb der Diapsiden genauer ermitteln. Diese Fischechsen hatten nämlich noch einige aufschlussreiche Merkmale ihrer landlebenden Vorfahren beibehalten.

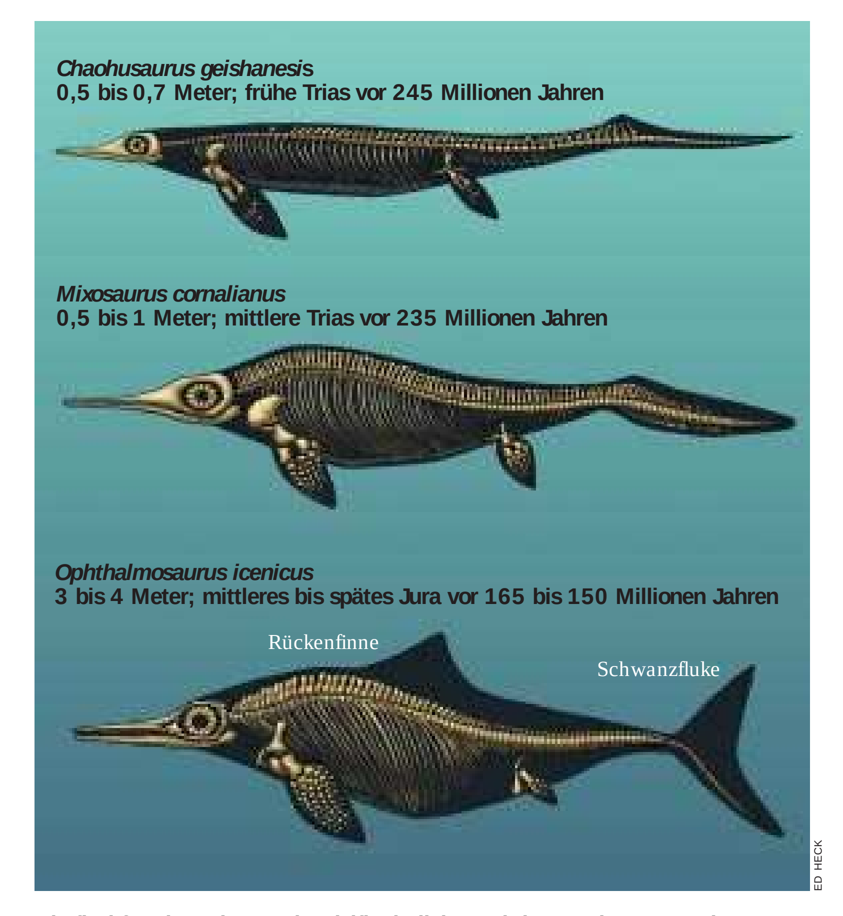
Der Evolution nachträglich zuschauen

Meine Kollegen und ich nehmen nach diesen Studien an, dass die Ichthyosaurier ungefähr dort im Reptilienstammbaum abzweigen, wo sich zwei große heute noch vorhandene Linien voneinander trennten. Zum einen Ast, den „Lepidosauriern", gehören die Schlangen und Echsen, zum anderen, den „Archosauriern", die Krokodile und Vögel – und früher die Dinosaurier.

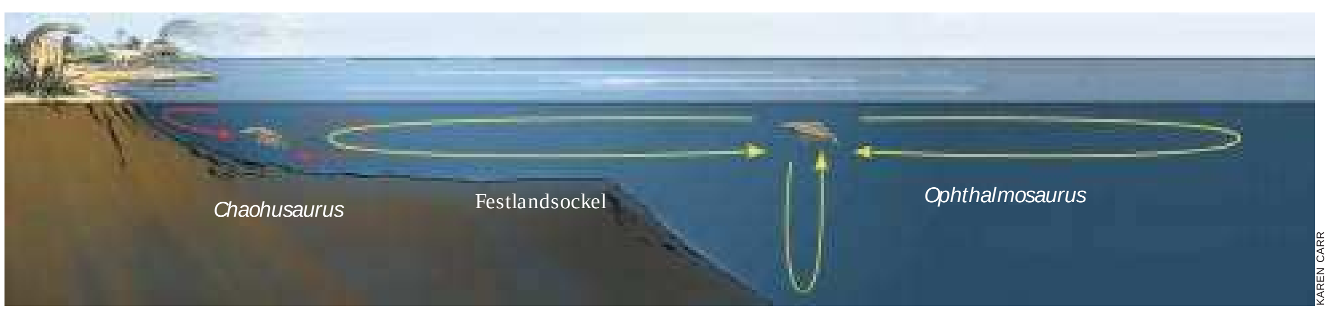
Wohl das Aufregendste an den neuen Entdeckungen dürfte sein, dass wir nun die Evolution hin zu den fischförmigen, hochseetüchtigen Ichthyosauriern mit all den aufwendigen neuen Anpassungen an diese Lebensweise vor Augen haben. So können wir endlich die Umwandlung der Gliedmaßen in Flossen nachvollziehen. Die Ichthyosaurier wiesen in der „Hand" nicht mehr gestreckte Knochen auf wie landlebende Reptilien. Sondern diese waren alle in der Querachse breiter als in der Längsachse. Auch waren sie alle ähnlich geformt. Die Knochen des „Handgelenks" unterschieden sich kaum von den anderen. Vor allem lagen diese Knochen eng zusammen in einer gemeinsamen Hülle aus weicherem Gewebe. Die Tiere besaßen also keine Zehen mehr, sondern eine kompakte, starke Flosse. Von Walen, Robben und Meeresschildkröten wissen wir, dass die gemeinsame Umhüllung der Fingerknochen die Gliedmaße stabilisiert. Die umschließenden Weichteile verbessern außerdem die Hydrodynamik. Denn solche Flossen weisen einen stromlinienförmigen Querschnitt auf. Mit Zehen wäre das nicht möglich.

Diese Evolution hin zu Flossen verlief allerdings keineswegs geradlinig. Besonders die „Zwischenformen" der Fischechsen zeigen dies, die nicht mehr den urtümlich schlanken Körperbau aufwiesen, aber auch noch nicht die Fischgestalt. Das evolutive Geschehen muss recht komplex gewesen sein: Mal verschwanden Zehen, mal kamen neue dazu, oder Zehen teilten sich sogar. So besaßen die ersten Ichthyosaurier noch den alten Daumen. Dessen Knochen gingen später verloren. Aufschlussreich ist auch, in welcher Reihenfolge die „Finger" im Leben des Tieres verknöcherten. Dies können wir an dem fischförmigen *Stenopterygius* gut nachvollziehen, also einem der späteren Fischsaurier. Von diesem Tier sind Fossilien von verschiedensten Altersstadien erhalten. Bei ihm erschienen nachträglich zu den schon ausgebildeten Fingern an beiden Seiten der Flosse weitere. Einige davon wuchsen an der Stelle des früheren Daumens.

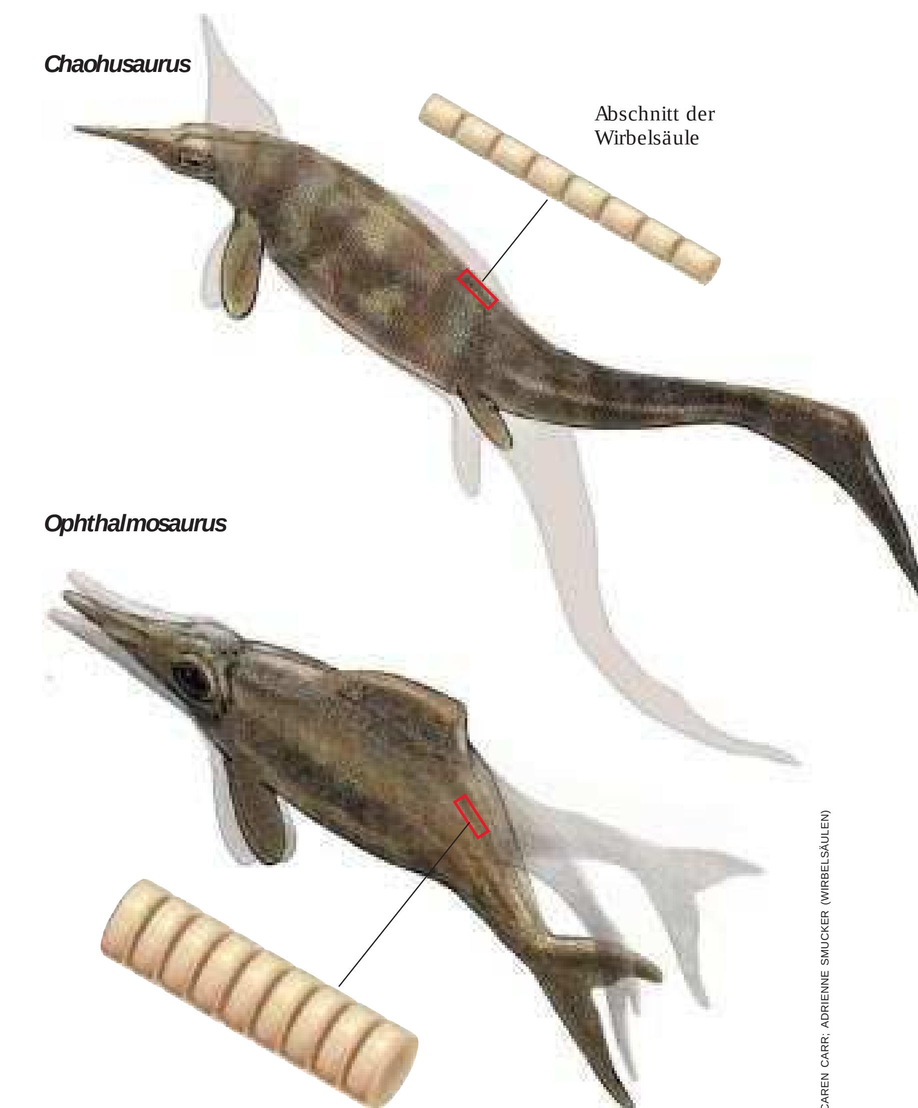
Auch wie sich das Rumpfskelett für den



Die fischförmigen, im Umriss delfinähnlichen Ichthyosaurier entstanden aus schlanken, in der Körperform noch eidechsenähnlichen Reptilien.



Die ersten Fischechsen müssen schlängelnd geschwommen sein – ähnlich wie Aale. Dank ihres schmalen Rückgrats und der auffallend vielen Wirbel konnten sie in flacheren Meereszonen beim Beutefang schnell und geschickt manövrieren. Später entstanden Arten mit viel kompakterer Wirbelsäule aus flachen Wirbelkörpern. Der Rumpf wurde nun steifer. Nur der Schwanzschlag trieb das Tier voran. Diese fortschrittlichen Fischechsen schwammen schnell und verbrauchten auf weite Distanz weniger Energie. Sie konnten im offenen Meer leben.



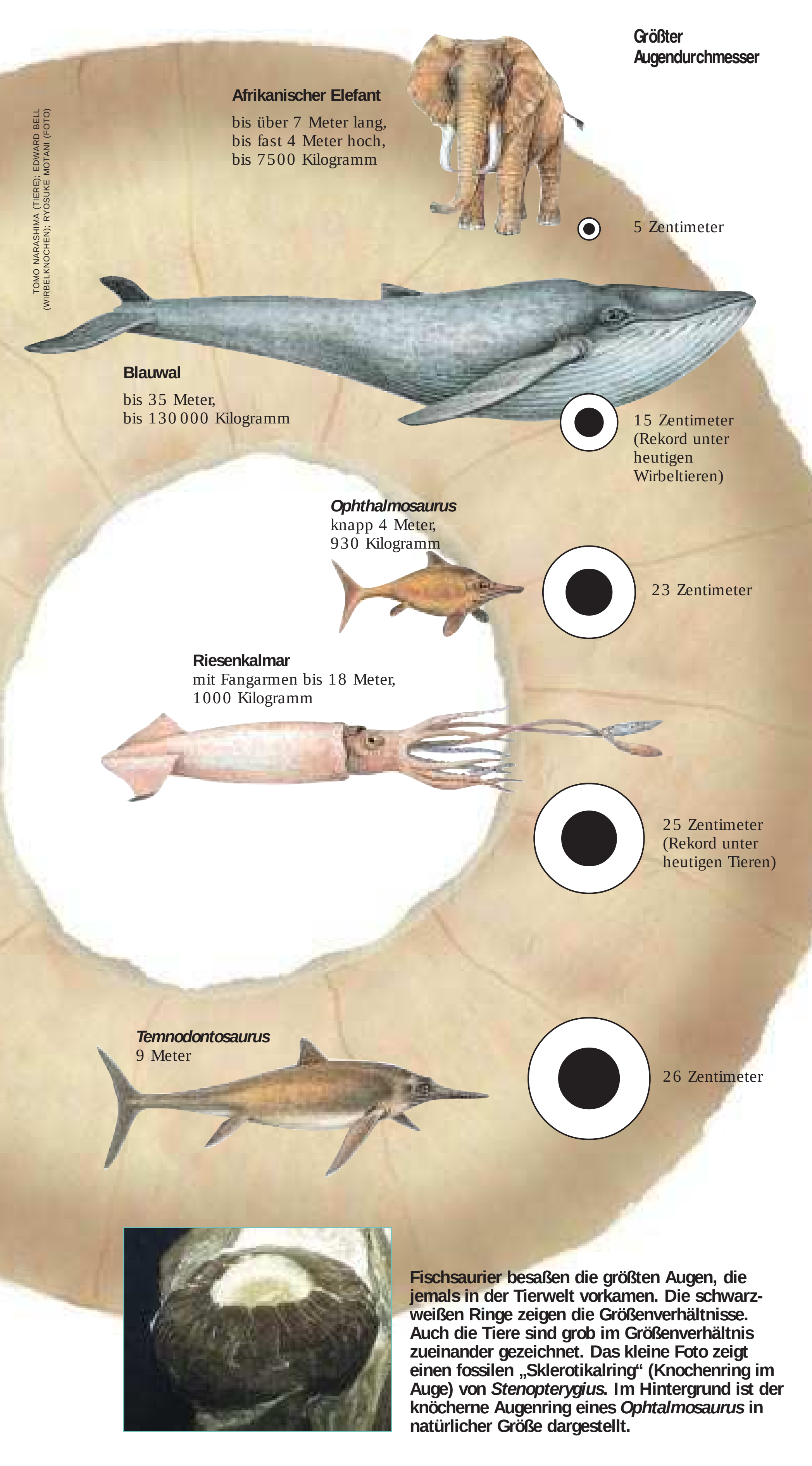
in der Mitte sehr dicken, stromlinienförmigen Körper ausbildete, verstehen wir dank der neuen Fossilien aus der Frühzeit nun besser. Die fischförmigen Arten besaßen auffällig gedrungene, flache, konkave Wirbel, die in der Form Eishockeyscheiben ähneln. Sie hatten dadurch ein sehr dickes, kräftiges Rückgrat. Diese Wirbelform kommt bei Diapsiden an sich sonst kaum vor. Die Paläontologen glaubten bisher, dass alle Ichthyosaurier solche Wirbel aufwiesen. Doch zu unserem Erstaunen besaßen die jetzt entdeckten ursprünglichen Vertreter ein viel dünneres Rückgrat mit längeren Wirbelkörpern etwa in der Form von Filmhülsen für Fotoapparate. Offenbar waren die Wirbel erst im Laufe der Evolution der Ichthyosaurier im Verhältnis wesentlich höher und breiter und zugleich etwas kürzer geworden.

Schwimmen wie Fische

Welchen Vorteil brachten die scheibenförmigen Wirbel für das Leben im offenen Meer? Um dies zu klären, haben wir uns angesehen, wie verschiedene Haie schwimmen. Katzenhaie einerseits sind schlank und haben keine hohe, halbmondförmige Schwanzflosse ausgebildet. Darin ähneln sie den frühen Fischsauriern. Makrelenhaie wie der Weiß- oder Menschenhai dagegen haben einen dicken Rumpf und eine große mondsichelförmige Schwanzflosse. In beidem gleichen sie den fortschrittlichen, fischförmigen Ichthyosauriern. Der Weiße Hai bewegt beim Schwimmen nur die Schwanzflosse, während sein Rumpf steif bleibt. Ein Katzenhai dagegen schlängelt seinen ganzen Körper. Hierfür muss er ein sehr bewegliches Rückgrat besitzen. Tatsächlich weist er besonders viele Wirbel auf, allein etwa vierzig im vorderen Körper, sozusagen dem Rumpf – etwa doppelt so viele wie in der Regel moderne Reptilien und Säuger. Ähnlich viele Wirbel wie Katzenhaie besaßen aber die frühen Ichthyosaurier.

Ein Tier, das schlängelnd schwimmt, ist gut daran angepasst, um in den flacheren Meeresgebieten über den Festlandsockeln seine Beute zu fangen – wie auch der Katzenhai. Er bringt für dieses recht dicht belebte, strukturierte Habitat die nötige Wendigkeit und Beschleunigung auf. Mit schlängelnden Bewegungen schwimmen auch heutige Echsen, etwa der Pflanzen fressende Galapagos-Meeresleguan. Dass die frühen Fischechsen, die noch mehr ans Leben im Wasser angepasst waren, sich mit dieser Schwimmtechnik vorzüglich behaupteten, lässt sich gut vorstellen. Die Tatsachen sprechen also dafür, dass die ersten Ichthyosaurier – die wie Katzenhaie aussahen und von echsenähnlichen Vorfahren abstammten – auf die gleiche Weise schwammen. Vermutlich lebten auch sie folglich in den flacheren Meereszonen der Kontinentalschelfe.

Schlängelndes Schwimmen bewährt sich zwar in Küstennähe, also in einem Habitat, wo viel Nahrung zu finden ist. Doch Tiere des offenen Ozeans, die wegen der lockeren Verteilung von Beutetieren große Strecken zurücklegen müssen, ▶



Fischsaurier besaßen die größten Augen, die jemals in der Tierwelt vorkamen. Die schwarzweißen Ringe zeigen die Größenverhältnisse. Auch die Tiere sind grob im Größenverhältnis zueinander gezeichnet. Das kleine Foto zeigt einen fossilen „Sklerotikalring" (Knochenring im Auge) von *Stenopterygius*. Im Hintergrund ist der knöcherne Augenring eines *Ophtalmosaurus* in natürlicher Größe dargestellt.

benötigen eine energetisch günstigere Art der Fortbewegung. Die Hochseehaie wie der Weißhai haben einen steifen Körper. Sie bewegen zum Vorwärtskommen nur die sichelförmige Schwanzflosse, die wie eine oszillierende Tragfläche funktioniert. Sie erzeugen mit dem Schwanz einen Vortrieb, der sie besonders schnell und effizient vorankommen lässt. Die fortschrittlichen Ichthyosaurier schwammen wahrscheinlich ähnlich.

Je dicker der Rumpf einer Haiart, einen desto größeren Durchmesser haben die Wirbel, also ähnlich wie bei den Ichthyosauriern. Beide Gruppen mussten sich während ihrer Evolution mit dem Erbe einer hohen Wirbelzahl arrangieren, die das Rückgrat für rasches Schwimmen mit dem Schwanz eigentlich zu labil machten. Zugleich erforderte die zunehmende Rumpfdicke, die für schnelle Fortbewegung physikalisch günstig war, stärkeren Halt durch die Wirbelsäule. Offenbar fand sich bei Haien wie bei Fischechsen eine ähnliche anatomische Lösung. Bei den Ichthyosauriern blieb die Wirbelzahl ungefähr gleich, doch das Rückgrat wurde mindestens um die Hälfte dicker und die Wirbel infolgedessen scheibenförmig. Dies machte den Körper gleichzeitig weniger biegsam und damit auch in dieser Hinsicht mehr zum schnellen, energiearmen Schwimmen über große Strecken geeignet.

Nicht die Haie, sondern die Wale liefern vielleicht Hinweise, wie sich die großen fischförmigen Ichthyosaurier ernährten. Diese Reptilien, die das offene Meer aufsuchen konnten, tauchten vermutlich auch in der Tiefsee. Sie fraßen nämlich großenteils Kopffüßer, also „Tintenfische". Bei einigen Fossilien fanden sich Reste des Mageninhalts. Wale mit dieser Ernährungsweise jagen ihre Beute in hundert bis tausend Metern Tiefe, manchmal in bis zu dreitausend. Nur bei so ausgedehnten Tauchzügen können die Meeressäuger in dem dünn besiedelten Lebensraum genügend Nahrung finden. Allerdings muss ein lungenatmendes Tier die weite Strecke in einem einzigen Atemzug zurücklegen. Wale speichern dazu Sauerstoff in ihren Geweben, unter anderem in der Muskulatur. Entscheidend ist aber vor allem auch, dass das Schwimmen nur wenig Energie kosten darf. Ein stromlinienförmiger Körper, der wenig Widerstand leistet, hilft Sauer-

stoff sparen – bei Walen wie wohl auch bei den fischförmigen Ichthyosauriern.

Dafür, dass manche Fischsaurier bis in die Tiefsee hinabstießen, gibt es noch weitere Anzeichen. Schwerere Tiere können in ihren Geweben insgesamt mehr Sauerstoff speichern und verbrauchen andererseits relativ weniger. Bei gleicher Körperlänge wog ein fischförmiger Ichthyosaurier sechsmal so viel wie ein echsenförmiger. Aber die fischförmigen Ichthyosaurier nahmen in der Evolution außerdem an Länge zu. Dadurch gewannen sie nochmals beträchtlich an Masse. Wie lange Fischsaurier unter Wasser bleiben konnten, lässt sich von heutigen luftatmenden tauchenden Wirbeltieren – hauptsächlich Vögeln und Säugern – hochrechnen. Demnach konnte ein 950 Kilogramm schwerer *Ophthalmosaurus* mindestens zwanzig Minuten lang tauchen. Bei vorsichtiger Schätzung hätte er dabei 600 Meter tief schwimmen können. Vermutlich gelangen ihm sogar Tauchzüge bis in 1500 Meter Tiefe.



RYOSUKE MOTANI

Von dieser kleinen Insel in Nordostjapan stammen zwei fast vollständige Skelette des bisher ältesten Fischsauriers: *Utatsusaurus*.

Sehen in der Tiefsee

Auch die Knochenstruktur lässt annehmen, dass die fischförmigen Ichthyosaurier wohl in der Tiefsee jagten. Die Rippen und die Knochen in den Gliedmaßen von landlebenden Wirbeltieren haben außen eine besonders kompakte Schicht. Das hilft, das Gewicht an Land zu tragen. Wegen des Auftriebs im Wasser brauchen Tiere dort diese Zusatzverstärkung nicht. Im Gegenteil behindern schwere Knochen eher das Auftauchen. Zum Speichern von Sauerstoff taugen sie kaum. Wie französische Forscher herausfanden, haben die Knochen heutiger tief tauchender Säuger eine weniger kompakte, mehr schwammartige äußere Schicht. Die „Rinde“ der Knochen fischförmiger Ichthyosaurier war von gleicher Art. Vermutlich war dies auch in ihrem Fall eine Anpassung an das Tieftauchen.

Der deutlichste Hinweis, dass die Fischsaurier in tiefen Zonen jagten, sind aber ihre riesigen Augen. Erstens ist dies gewöhnlich ein Zeichen, dass ein Tier in schlechten Lichtverhältnissen sieht. Der Augendurchmesser übertraf bei manchen späteren Arten zwanzig Zentimeter. *Ophthalmosaurus* beispielsweise besaß 23 Zentimeter große Augen, im Verhältnis zur Körpergröße von weniger als vier Metern der Rekord im Tierreich.

Wie gut sahen die fortschrittlichen Fischsaurier? Da ihre Augen offenbar im Verlauf ihrer Evolution größer wurden, nahm sicherlich auch deren Lichtempfindlichkeit zu. Dieses Sehvermögen können wir anhand der Fossilien kalkulieren. Wie bei den meisten Wirbeltieren lag außen im Augapfel der Ichthyosaurier ein Ring aus Knochenplatten, der „Sklerotikalring“, der bei einigen Funden erhalten ist. Dieser knöcherne Ring half wahrscheinlich, die großen Augen gegen den Wasserdruck zu stabilisieren. Aus seinen Maßen kann man den Augendurchmesser und die größtmögliche Öffnung des Auges abschätzen. Hieraus lässt sich auf die „Lichtstärke“ schließen. (Bei einem optischen System ist dies das Verhältnis aus dem Durchmesser der Eintrittspupille und der Brennweite.) Die Lichtstärke von Kameraobjektiven mittlerer Qualität etwa beträgt 1:3,5. Hochwertige Objektive haben eine Lichtstärke von 1:1,0. Je größer dieses Öffnungsverhältnis ist – also je kleiner die Blendenzahl eines Kameraobjektivs –, umso kürzer ist die Belichtungszeit für eine Aufnahme. Für das menschliche Auge beträgt der Quotient etwa 1:2,1; für das von Katzen sogar 1:0,9. Eine Katze könnte wahrscheinlich noch in mindestens fünfhundert Meter Wassertiefe sehen. Für *Ophthalmosaurus* berechneten wir ebenfalls den Wert 1:0,9. Da dieser Fischsaurier aber außerdem sehr viel größere Augen besaß als Katzen, sah er vermutlich in noch größerer Tiefe.

Viele Merkmale der Ichthyosaurier entstanden im Zusammenhang. Das betrifft unter anderem ihre Körperform, die Wirbelsäule, Augen, Atemkapazität, Lebensraum und Nahrung. Was dabei jeweils Ursache oder Wirkung war, wissen wir aber nicht. Doch so viel steht fest: Diese Anpassungen ermöglichten den Fischsauriern, für 155 Millionen Jahre die Meere zu verunsichern. Die neuen Fossilien von den frühesten Ichthyosauriern aus Japan und China zeigen uns, wie diese Tiergruppe sich entwickelte und wodurch sie so erfolgreich wurde. Völlig unklar ist aber, warum sie dann vor 90 Millionen Jahren ausstarb.

Für die frühen eidechsenförmigen Arten, die das Flachmeer bewohnten, lässt sich noch leichter eine Ursache vorstellen. Ihr Lebensraum könnte verloren gegangen sein, zum Beispiel weil der Meeresspiegel drastisch sank und weite Bereiche der Festlandsockel trocken fielen. Doch das offene Meer, in dem die fischförmigen Arten lebten, verschwand nie. Ungefähr zu der Zeit, als die Ichthyosaurier ausstarben, tauchten die ersten modernen Haie auf. Waren beide Konkurrenten? Bisher fanden die Paläontologen darauf keinen deutlichen Hinweis.

Vielleicht werden die Wissenschaftler nie ganz verstehen, warum die Ichthyosaurier ausstarben. Doch über ihre Evolution und ihre Lebensweise werden wir sicherlich noch manches Unerwartete herausfinden. ■

Ryosuke Motani *arbeitet am Royal Ontaria Museum in Toronto (Kanada) in der Abteilung für Paläobiologie. Schon während seines Studiums an der Universität Tokio begann er über Fischsaurier zu forschen. An der Universität Toronto promovierte er 1997 mit einer Arbeit über diese Reptilien. Dann ging er zunächst an die Universität von Kalifornien nach Berkeley und kehrte im September 1999 wieder nach Kanada zurück.*

Das Innenleben des Protons

Nach acht Jahren Laufzeit des Speicherrings Hera in Hamburg – einer Art „Super-Elektronenmikroskop“ – hat sich das Gesamtbild von der Struktur des Protons und der Naturkräfte erheblich erweitert.

Von Robert Klanner

Vier fundamentale Naturkräfte regieren die Welt, in der wir leben: die Gravitation, die elektromagnetische, die schwache und die starke Kraft. Die Gravitation lässt den Apfel vom Baum fallen und die Erde um die Sonne kreisen. Die elektromagnetische Kraft verbindet negativ geladene Elektronen und positiv geladene Atomkerne zu Atomen und sorgt für Strom aus der Steckdose. Die schwache Kraft ermöglicht die Erzeugung von Strahlungs- und Wärmeenergie durch Kernfusion in der Sonne sowie den radioaktiven Zerfall von Atomkernen. Die starke Kraft schließlich hält die elementarsten Bausteine der Materie zusammen: Sie bindet punktförmige Partikel – die so genannten Quarks und Gluonen – innerhalb der Protonen und Neutronen und verhindert, dass die Atomkerne infolge der gegenseitigen Abstoßung der Protonen auseinander fliegen.

Im täglichen Leben nehmen wir die Gravitation am unmittelbarsten wahr. In der Teilchenphysik hingegen, in der die Wechselwirkungen subatomarer Partikel untersucht werden, spielt sie kaum eine Rolle, weil sie weitaus schwächer ist als die anderen drei Grundkräfte.

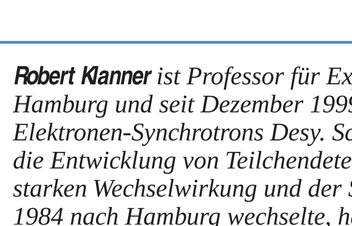
Die elektromagnetische und die schwache Kraft sind inzwischen bestens verstanden. Alle gesicherten experimentellen Daten werden durch ein Ordnungsschema, das so genannte Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben, in dem die bekannten Elementarteilchen zusammengefasst sind (siehe Kasten Seite 68). Bisher hat es alle Überprüfungen durch Präzisionsmessungen bestanden – auch die in diesem Artikel beschriebenen. Wir Physiker sind allerdings überzeugt, dass diese Theorie noch erweitert werden muss, da sie zu viele grundlegende Fragen offen lässt.

Die starke Kraft gibt uns besonders viele Rätsel auf:

- Wie setzt sich das Proton aus Quarks und Gluonen zusammen?
- Wie verändert sich die starke Kraft mit dem Abstand der Wechselwirkungspartner?
- Warum sind Quarks und Gluonen stets in Teilchen wie Protonen oder Neutronen eingeschlossen und können nicht als freie Partikel beobachtet werden?
- Haben die vier fundamentalen Kräfte vielleicht einen gemeinsamen Ursprung, wie die meisten Physiker vermuten, und können sie durch eine vereinheitlichte Theorie beschrieben werden?

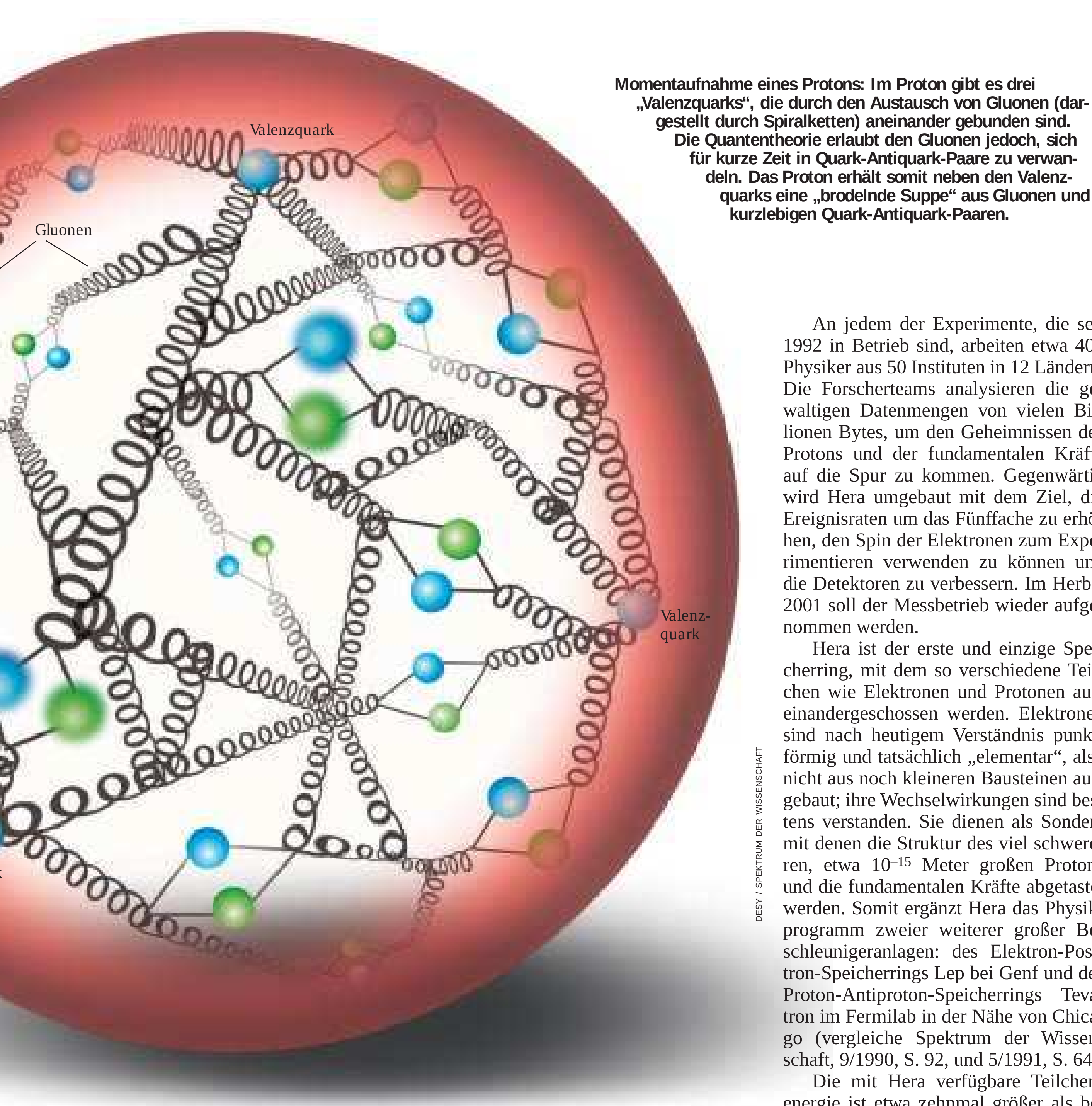
Experimente mit Teilchenbeschleunigern, wie sie etwa an dem Speicherring Hera in Hamburg in den letzten acht Jahren durchgeführt wurden, tragen wesentlich dazu bei, Antworten auf solche Fragen zu finden.

Hera (eine Abkürzung für Hadron-Elektron-Ring-Anlage) ist der größte



__Robert Klanner__ ist Professor für Experimentalphysik an der Universität Hamburg und seit Dezember 1999 Forschungsdirektor des Deutschen Elektronen-Synchrotrons Desy. Schwerpunkte seiner Forschung sind die Entwicklung von Teilchendetektoren sowie die Untersuchung der starken Wechselwirkung und der Struktur der Hadronen. Bevor er 1984 nach Hamburg wechselte, hatte er bereits an mehreren großen Beschleunigern gearbeitet: so in Serpuchow (Russland), am Fermilab bei Chicago und am Europäischen Labor für Teilchenphysik Cern bei Genf.





Momentaufnahme eines Protons: Im Proton gibt es drei „Valenzquarks“, die durch den Austausch von Gluonen (dargestellt durch Spiralketten) aneinander gebunden sind. Die Quantentheorie erlaubt den Gluonen jedoch, sich für kurze Zeit in Quark-Antiquark-Paare zu verwandeln. Das Proton erhält somit neben den Valenzquarks eine „brodelnde Suppe“ aus Gluonen und kurzlebigen Quark-Antiquark-Paaren.

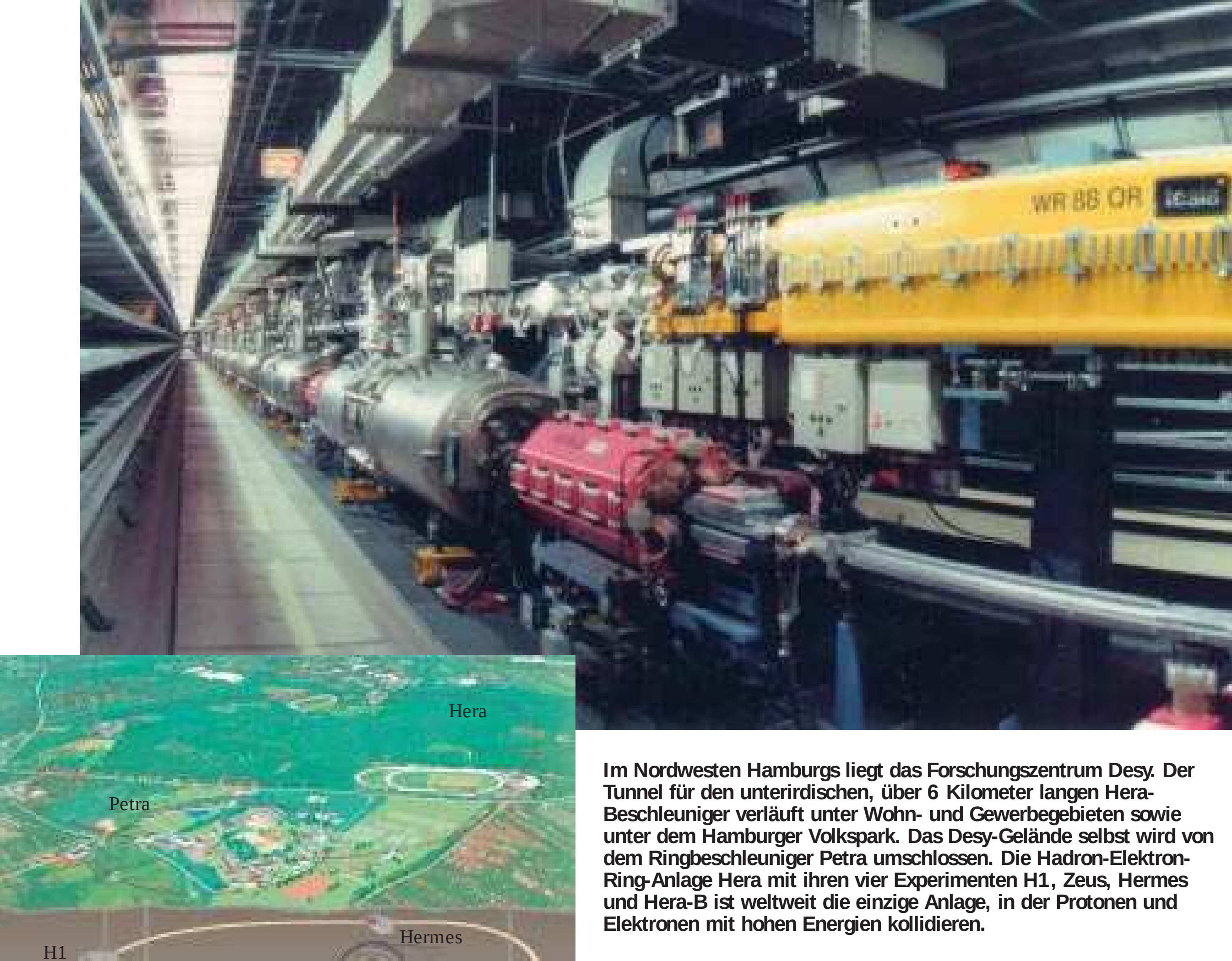
Teilchenbeschleuniger am Deutschen Elektronen-Synchrotron Desy in Hamburg. Die Anlage besteht aus zwei Beschleunigerringen mit einem Umfang von jeweils 6336 Metern, die in etwa 30 Meter Tiefe in einem Tunnel unter den Stadtteilen Bahrenfeld und Lurup aufgebaut wurden. Der eine Ring beschleunigt Elektronen (wahlweise auch deren Antiteilchen, die Positronen) auf eine Energie von 27,5 Gigaelektronenvolt (GeV, Milliarden Elektronenvolt), der andere Protonen auf eine Energie von 920 GeV.

Im Hochvakuum der beiden Speicherringe kreisen Elektronen und Protonen stundenlang in entgegengesetzter Richtung. Fast mit Lichtgeschwindigkeit durchfliegen sie ihren Rundkurs, etwa 47 000-mal in der Sekunde, und werden in zwei Experimentierhallen frontal aufeinander geschossen. Dort befinden sich die Experimente namens H1 und Zeus – haushohe und mehrere tausend Tonnen schwere Nachweisgeräte, welche die Zusammenstöße zwischen den Partikeln und die Spuren der in den Kollisionen erzeugten Sekundärteilchen minutiös aufzeichnen (Bild Seite 65). Von den vielen Tausenden solcher „Ereignisse“, die jede Sekunde stattfinden, werden die interessantesten für die anschließende Auswertung gespeichert.

An jedem der Experimente, die seit 1992 in Betrieb sind, arbeiten etwa 400 Physiker aus 50 Instituten in 12 Ländern. Die Forscherteams analysieren die gewaltigen Datenmengen von vielen Billionen Bytes, um den Geheimnissen des Protons und der fundamentalen Kräfte auf die Spur zu kommen. Gegenwärtig wird Hera umgebaut mit dem Ziel, die Ereignisraten um das Fünffache zu erhöhen, den Spin der Elektronen zum Experimentieren verwenden zu können und die Detektoren zu verbessern. Im Herbst 2001 soll der Messbetrieb wieder aufgenommen werden.

Hera ist der erste und einzige Speicherring, mit dem so verschiedene Teilchen wie Elektronen und Protonen aufeinandergeschossen werden. Elektronen sind nach heutigem Verständnis punktförmig und tatsächlich „elementar“, also nicht aus noch kleineren Bausteinen aufgebaut; ihre Wechselwirkungen sind bestens verstanden. Sie dienen als Sonden, mit denen die Struktur des viel schwereren, etwa 10^{-15} Meter großen Protons und die fundamentalen Kräfte abgetastet werden. Somit ergänzt Hera das Physikprogramm zweier weiterer großer Beschleunigeranlagen: des Elektron-Positron-Speicherrings Lep bei Genf und des Proton-Antiproton-Speicherrings Tevatron im Fermilab in der Nähe von Chicago (vergleiche Spektrum der Wissenschaft, 9/1990, S. 92, und 5/1991, S. 64).

Die mit Hera verfügbare Teilchenenergie ist etwa zehnmal größer als bei bisherigen ähnlichen Untersuchungen von Protonen mit Elektronen oder Myonen (den schweren „Verwandten“ der Elektronen). Hera ist also gewissermaßen ein „Super-Elektronenmikroskop“, das den weltweit schärfsten Blick ins Proton ermöglicht – bis hinunter zu Strukturen, die 2000-mal kleiner sind als das Proton selbst: das sind 0,000 000 000 000 000 000 5 Meter. Auf dieser Größenskala können die Physiker nun auch die Kräfte zwischen Elektronen und Quarks untersuchen sowie diejenigen zwischen den Bausteinen des Protons – also zwischen den einzelnen Quarks sowie zwischen Quarks und Gluonen. Dies ist von unschätzbarem Vorteil: Denn je kleiner ▶



Im Nordwesten Hamburgs liegt das Forschungszentrum Desy. Der Tunnel für den unterirdischen, über 6 Kilometer langen Hera-Beschleuniger verläuft unter Wohn- und Gewerbegebieten sowie unter dem Hamburger Volkspark. Das Desy-Gelände selbst wird von dem Ringbeschleuniger Petra umschlossen. Die Hadron-Elektron-Ring-Anlage Hera mit ihren vier Experimenten H1, Zeus, Hermes und Hera-B ist weltweit die einzige Anlage, in der Protonen und Elektronen mit hohen Energien kollidieren.

die Abstände sind, bei denen die Naturkräfte untersucht werden, desto weiter können wir Teilchenphysiker in Richtung Urkraft vordringen und zurück in die Entstehungsgeschichte des Universums blicken.

Teilchen ohne nachweisbare Ausdehnung

Das Standardmodell fasst den gesamten gesicherten Wissensstand der Teilchenphysik zusammen. Es beschreibt die Grundbausteine der Materie und die Regeln, die sie befolgen. Aus den Quarks und Leptonen – zu Letzteren gehört auch das Elektron – ist alle Materie aufgebaut. Die vier fundamentalen Kräfte zwischen den Teilchen werden durch Boten- oder Austauschteilchen vermittelt. Alle diese Partikel sind „punktförmig“, was hierbei nichts anderes heißt, als dass selbst bei Experimenten mit höchster Auflösung keine Effekte gemessen werden können, die auf eine Ausdehnung der Teilchen zurückzuführen sind.

Die Stärke jeder der vier fundamentalen Kräfte wird durch Eigenschaften der Teilchen bestimmt, die man als verallgemeinerte Ladungen bezeichnen kann. Im elektromagnetischen Fall ist es die wohl bekannte elektrische Ladung, bei der Gravitation die Masse. Für die schwache und die starke Kraft fehlt uns die Alltagserfahrung; die Begriffe „schwache Ladung“ und „Farbladung“, welche die Physiker für diese Eigenschaften gewählt haben, bleiben also etwas abstrakt.

Diese verschiedenartigen „Ladungen“ werden in unterschiedlichen Einheiten gemessen: die Masse beispielsweise in Gramm, die elektrische Ladung in Coulomb. Um die Kräfte direkt vergleichen zu können, verwenden die Teilchenphysiker jedoch anstelle der Ladungen dimensionslose Kopplungskonstanten. Auch hier gilt: je größer die Kopplungskonstante, desto intensiver die Abstrahlung von Botenteilchen und desto stärker die Kraft. Wie wir gleich noch sehen werden, handelt es sich dabei nicht im Wortsinne um Konstanten, da die Größen der Ladungen vom Abstand abhängen, bei dem sie gemessen werden.

Die Kopplungskonstante der elektromagnetischen Kraft ist den Physikern als Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante bekannt. Ihren Wert hat man experimentell zu etwa 1/137 bestimmt. Da diese Zahl viel kleiner als Eins ist, gelingt es, die Gleichungen der Quantentheorie des Elektromagnetismus, der Quantenelektrodynamik (QED), zu lösen und präzise Vorhersagen für die elektromagnetischen Eigenschaften der fundamentalen Teilchen und ihrer Reaktionen zu machen. Die experimentellen Daten stimmen bis auf die zwölfte Stelle nach dem Komma

damit überein. Somit ist die QED die am genausten überprüfte physikalische Theorie und das Muster für die Beschreibung aller Kräfte zwischen den Elementarteilchen.

Die Masse der Botenteilchen bestimmt wesentlich, wie die Kraft vom Abstand abhängt: Ist die Masse null wie beim Photon und dem Graviton – den Austauschteilchen der elektromagnetischen Kraft und der Gravitation –, ist die Reichweite unendlich. Deshalb kennen wir diese Kräfte auch aus unserer makroskopischen Welt im täglichen Leben. Die so genannten *W*- und *Z*-Bosonen, die Botenteilchen der schwachen Kraft, weisen etwa das Hundertfache der Protonenmasse auf. Deshalb ist die Reichweite der schwachen Kraft auf den hundertsten Teil des Protonendurchmessers begrenzt, also auf 2×10^{-18} Meter.

Für die starke Kraft ist die Situation gänzlich anders. Deren Botenteilchen – die Gluonen – sind masselos; dennoch beträgt die Reichweite der starken Kraft nur etwa einen Protonenradius (10^{-15} Meter). Der Wert der starken Kopplungskonstanten ist nämlich nur bei Abständen, die viel kleiner sind als der Protonenradius, so klein, dass wir das Bild einzelner Botenteilchen anwenden und die Gleichungen der Quantenchromodynamik (QCD) wie in der QED lösen können. Für größere Abstände wird die Kopplungskonstante durch Wechselwirkungen mit den farbgeladenen Gluonen so groß, dass es zum Beispiel unmöglich ist, eines der drei Quarks, aus denen das Proton besteht, aus seinem Verband zu lösen. Hier versagen auch die Rechenmethoden der QCD, und es ist bisher nicht gelungen, theoretisch die Fragen nach der Struktur des Protons oder nach dem „Eingesperrtsein“ (dem so genannten *confinement*) der Quarks und Gluonen im Proton befriedigend zu beantworten. Um hier weiter zu kommen, sind wir zunächst auf experimentelle Untersuchungen angewiesen, wie sie bei Hera durchgeführt werden.

Wenn im Hera-Ring ein Elektron mit hoher Energie frontal auf ein Proton trifft, sendet es ein Botenteilchen aus, das mit den Bestandteilen des Protons in Wechselwirkung tritt. Vom Impuls (dem Produkt aus Masse und Geschwindigkeit), den das Botenteilchen dabei überträgt, hängt es ab, bis zu welchem Abstand die Kräfte untersucht werden können: je größer der Impulsübertrag, desto besser die räumliche Auflösung des Hera-Mikroskops. Die Energien der Elektronen- und Protonenstrahlen werden so gewählt, dass ein maximaler Impulsübertrag von 320 GeV/c und eine Auflösung von 5×10^{-19} Meter erreicht wird. Damit ist das Auflösungsvermögen von Hera etwa fünfmal genauer als die Reichweite der schwachen Kraft.

Für jedes einzelne Ereignis lässt sich aus Energie und Winkel des gestreuten Elektrons der Impuls der Botenteilchen bestimmen. So wird bei Hera die Stärke der Kräfte direkt als Funktion des Abstandes gemessen.

Aus Energie und Impuls des Botenteilchens kann außerdem der Bruchteil des Protonimpulses bestimmt werden, den das streuende Quark besaß. Wegen der hohen Energie der Hera-Teilchenstrahlen können selbst Quarks mit dem winzigen Impulsanteil von 10^{-5} mit einer Auflösung von 5×10^{-16} Metern untersucht werden. Zuvor war dies nur bis zu Anteilen oberhalb von 10^{-3} möglich. Hera eröffnete also auch hier den Blick in einen gänzlich neuen physikalischen Bereich.

Suche nach der Urkraft

Eine wesentliche Erkenntnis ergibt sich aus der Stärke der elektromagnetischen und der schwachen Kraft, die Hera als Funktion des Abstandes gemessen hat. Hiermit konnte direkt bestätigt werden, dass bei Abständen, die kleiner sind als die Reichweite der schwachen Kraft, beide Kräfte die gleiche Stärke aufweisen, und dass der Grund für die unterschiedliche Stärke bei größeren Abständen in den verschiedenen Massen der Botenteilchen liegt. Schwache und elektromagnetische Kraft sind demnach nur verschiedene Erscheinungsformen ein und derselben Grundkraft (Bild auf Seite 67). Diese experimentelle Bestätigung ist ein wichtiger Schritt zur „großen Vereinheitlichung“ aller vier fundamentalen Naturkräfte.

Für den nächsten Schritt auf dem Weg zu dieser Vereinheitlichung gibt es bereits erste Hinweise: Extrapoliert man die gemessenen Stärken der elektroschwachen und der starken Kraft zu winzigen Abständen, so sollten sie bei dem unvorstellbar kleinen Wert von etwa 10^{-29} Meter gleich groß werden. Allerdings werden die Physiker zu solch kleinen Abständen niemals experimentell vordringen können: Der erforderliche Teilchenbeschleuniger müsste die Ausmaße unseres gesamten Milchstraßensystems haben.

Deshalb sind hier die Theoretiker gefordert. Deren vielversprechendster Ansatz ist die so genannte Supersymmetrie. Diese Theorie sagt neue Teilchenfamilien voraus, deren Spuren mit der nächsten Generation von Teilchenbeschleunigern zu finden sein sollten. Hier setzen die Physiker ihre Hoffnung in den Large Hadron Collider (LHC), einen Speicherring für Protonen, der gegenwärtig am Europäischen Laboratorium für Teilchenphysik Cern in Genf gebaut wird, und in Tesla, den in Hamburg geplanten Linearbeschleuniger für Elektronen und Positronen.

Was passiert, wenn im Hera-Beschleuniger Protonen und Elektronen mit hoher Energie zusammenstoßen, beobachten hochsensible, hausgroße Nachweisgeräte. Das Bild zeigt den Zeus-Detektor, der ebenso wie der Detektor H1 die Spuren der Teilchentrümmer aufzeichnet.



DESY

Aus der außergewöhnlichen Übereinstimmung der mit Hera gewonnenen Messdaten mit den Vorhersagen des Standardmodells können wir bereits folgende Schlüsse ziehen:

- Quarks und Elektronen sind offenbar tatsächlich Materiepunkte. Zumindest ist ihr Durchmesser nicht größer als ein Tausendstel des Protonendurchmessers, also etwa 10^{-18} Meter. Sind wir damit vielleicht am Ende der Kette aus immer weiter teilbaren Materieteilchen angelangt, die vom Kristall über das Molekül, das Atom, den Atomkern und das Proton und Neutron bis schließlich zum Quark und Elektron reicht?
- Wir können ausschließen, dass es zusätzliche Fundamentalkräfte gibt, deren Reichweiten größer als das Tausendfache des Protonenradius sind.
- Über die uns vertrauten drei Raumdimensionen hinaus kann es nicht mehr als drei zusätzliche Dimensionen geben, deren Ausdehnung mehr als 10^{-18} Meter beträgt. Nach dem Umbau von Hera wird es mit der dann noch besseren Auflösung möglich sein, die Suche nach unbekannten Raumdimensionen bei noch kleineren Abständen fortzusetzen.

Brodelnde Quark-Gluon-Suppe

Zwar wird auch dann die Energie von Hera ganz und gar nicht ausreichen, die Vereinigung der elektroschwachen mit der starken Kraft nachzuweisen. Doch der Blick ins Innere des Protons verrät einiges über die Natur der starken Kraft. So konnten die Hera-Experimente H1 und Zeus die Stärke dieser Kraft zwischen den Quarks mit hoher Präzision vermessen und dadurch die starke Kopplungskonstante als Funktion des Abstandes bestimmen. Das von der QCD vorhergesagte starke Anwachsen bei großen Abständen wurde dadurch eindrucksvoll bestätigt.

Hier sei nur eine der verwendeten Messmethoden kurz beschrieben: Neben den Ereignissen, in denen das gestreute Elektron und ein vom gestreuten Quark erzeugtes Teilchenbündel vom Kollisionsort wegfliegen, findet man auch Ereignisse mit einem zusätzlichen Teilchenbündel. Dieses stammt von einem Gluon, dem Botenteilchen der starken Kraft, das in der Wechselwirkung abgestrahlt wird. Die Wahrscheinlichkeit für eine solche Abstrahlung eines Gluons ist direkt proportional zur starken Kopp-

Protonen im Super-Elektronenmikroskop

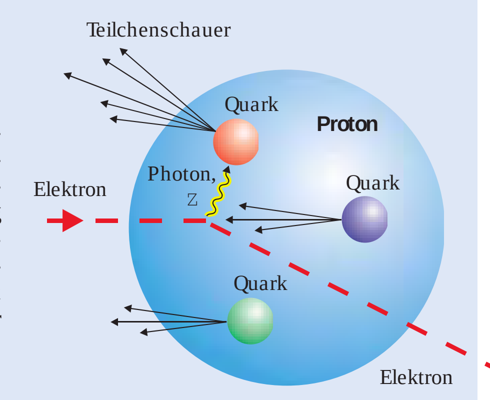
Vereinheitlichung der schwachen und elektromagnetischen Kräfte

Die Hera-Wissenschaftler konnten durch Kollisionen von Elektronen und Protonen experimentell bestätigen, dass die schwache und die elektromagnetische Kraft zwei Erscheinungsformen einer umfassenderen, der so genannten elektroschwachen Kraft sind. Dazu verglichen die Physiker die gemessenen Häufigkeiten zweier Teilchenreaktionen:

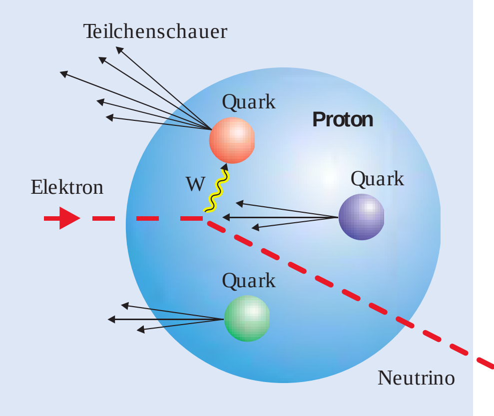
- **Neutraler-Strom-Reaktion:** „Elektron trifft auf Proton; daraus entsteht ein Elektron nebst anderen Teilchen." Bei dieser Teilchenreaktion erfolgt der Kräfteaustausch zwischen Elektron und einem der Quarks im Proton über neutrale Botenteilchen der elektromagnetischen (Photonen) oder der schwachen Kraft (Z^0-Bosonen). Die Häufigkeit, mit der diese Reaktion auftritt, ist ein Maß für die Stärke der elektromagnetischen und der schwachen Kraft.
- **Geladener-Strom-Reaktion:** „Elektron trifft auf Proton; daraus entsteht ein Neutrino nebst anderen Teilchen." Bei dieser Teilchenreaktion erfolgt der Kräfteaustausch über die geladenen Botenteilchen der schwachen Kraft (W^+- oder W^--Bosonen). Die Häufigkeit, mit der diese Reaktion auftritt, ist ein Maß für die Stärke der schwachen Kraft.

In beiden Reaktionen wird das Quark, welches das Botenteilchen aufgenommen hat, aus dem Proton herausgeschlagen. Dabei erzeugt es – unter einem großen Winkel zur Flugrichtung des Protons – ein Bündel von Teilchen. Die verbleibenden zwei Quarks des Protons fliegen in ihrer ursprünglichen Richtung weiter und erzeugen ebenfalls Teilchenbündel, welche die Apparatur aber größtenteils ungesehen verlassen. Entsendet das Elektron beim Stoß ein Photon oder Z-Boson (neutraler Strom), so misst man das abgelenkte Elektron im Detektor. Wird hingegen ein geladenes W-Boson ausgetauscht (geladener Strom), so verwandelt sich das Elektron in ein Neutrino, das die Nachweisapparatur spurlos durchquert.

Aus der gemessenen Häufigkeit dieser beiden Teilchenreaktionen als Funktion des Impulsübertrags lässt sich direkt die Vereinheitlichung der beiden wirkenden Kräfte ablesen: Bei kleinen Impulsüberträgen, also bei großen Abständen zwischen Elektron und Quark im Proton beim Zusammenstoß, tritt die „Neutraler-Strom-Reaktion" wesentlich häufiger auf als die „Geladener-Strom-Reaktion". In diesem Fall ist also die elektromagnetische Kraft wesentlich stärker als die schwache Kraft (Grafik auf Seite 67). Bei großen Impulsüberträgen und entsprechend kleinen Abständen – kleiner als die Reichweite der schwachen Kraft – sind beide Reaktionen gleich häufig, also beide Kräfte gleich stark: Sie vereinigen sich zur elektroschwachen Kraft.



Kräfteaustausch über neutrale Botenteilchen, also Photonen oder Z^0-Bosonen, (eine so genannte Neutraler-Strom-Reaktion)



Kräfteaustausch über geladene Botenteilchen, also W^+- oder W^--Bosonen, (eine so genannte Geladener-Strom-Reaktion)

DESY

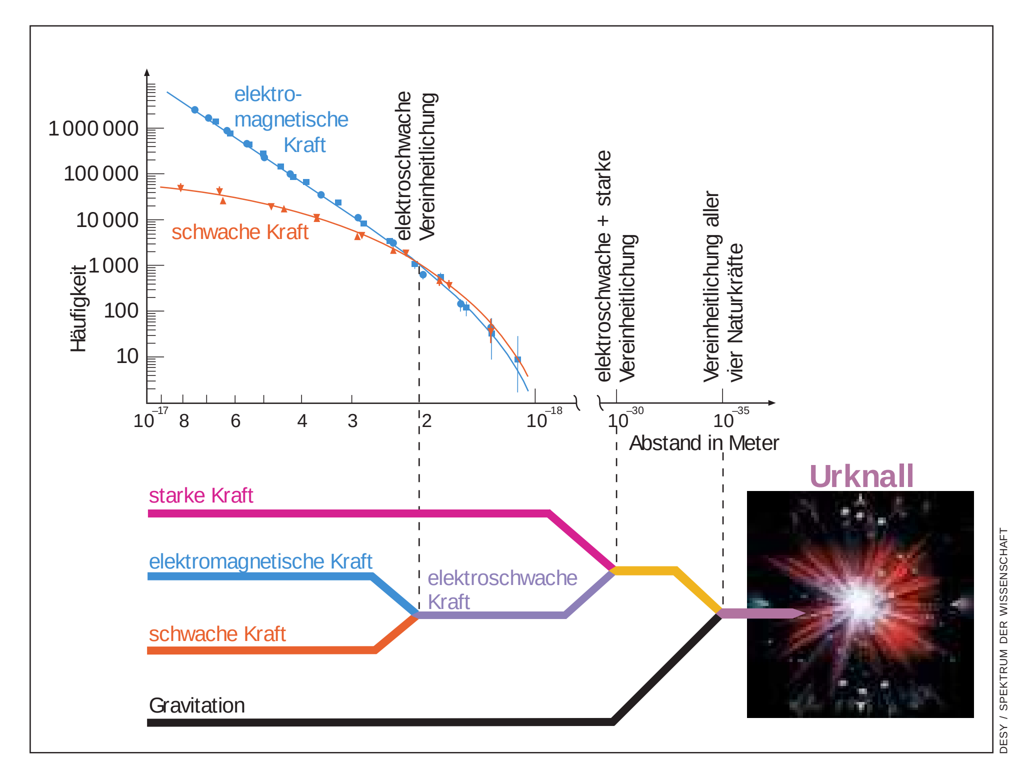
lungskonstanten, also zur Kraft zwischen den Quarks. Aus der Anzahl der beobachteten Ereignisse mit einem Gluon als Funktion des Impulsübertrags lässt sich die Abstandsabhängigkeit der starken Kopplungskonstante messen. Die Ergebnisse bestätigen quantitativ die Vorhersage der Quantenchromodynamik für Abstände zwischen 10^{-16} und 10^{-18} Meter.

Die Werte, die andere Messmethoden sowie Messungen in verschiedenen Teilchenreaktionen sowohl bei Hera als auch bei anderen Beschleunigern ergeben haben, stimmen hiermit überein. Dies stärkt das Vertrauen, dass die QCD die starke Kraft tatsächlich korrekt beschreibt.

Die Struktur des Protons präzise messen zu können – das war eine wesentliche Motivation für den Bau von Hera. Dieses Ziel haben die beiden internationalen Forscherteams der Experimente H1 und Zeus inzwischen erreicht. Die Messfehler liegen lediglich zwischen zwei und fünf Prozent, und dies bei Impulsen der Botenteilchen, die viele Größenordnungen überstreichen. Diese Messungen sind auf der Welt einzigartig.

Eine erste große Überraschung gab es im Bereich kleiner Impulsanteile der Quarks, in den Hera neu vorgestoßen ist: Dort steigt die gemessene Anzahl der Quarks und Gluonen im Proton dramatisch an. Das bedeutet anschaulich: Betrachtet man das Proton mit einer Brille, durch die sich nur solche Bestandteile erkennen lassen, die mehr als ein Prozent des Impulses des Protons tragen, so sieht man vor allem nur die drei Valenzquarks, die für die Ladung des Protons verantwortlich sind. Benutzt man hingegen eine Brille, die nur Bestandteile zeigt, welche weit weniger als ein Prozent des Protonimpulses tragen, so sieht man plötzlich immens viele Quarks und Gluonen. Dies ergibt ein völlig neues Bild vom Innenleben des Protons.

Vor den Hera-Messungen war zwar bekannt, dass die Quarks im Proton Gluonen aussenden, und dass diese wiederum weitere Gluonen oder Quark-Antiquark-Paare erzeugen. Die meisten Physiker waren aber überzeugt, dass sich neben den drei Valenzquarks nur wenige Quark-Antiquark-Paare und Gluonen im Proton befinden, dieses also fast leer ist. Den neuen Messungen zufolge gleicht das Innere eines Protons jedoch eher einer dicken, brodelnden Suppe, in der Gluonen und Quark-Antiquark-Paare unaufhörlich abgestrahlt und wieder vernichtet werden. Diese hohe Dichte der Gluonenabstrahlung stellt einen gänzlich neuen, bisher nicht untersuchten Zustand der starken Kraft dar. Unserer Meinung



Die Grafik zeigt die Häufigkeit der Teilchenreaktionen der elektromagnetischen und der schwachen Kraft. Für Abstände, die größer sind als die Reichweite der schwachen Kraft (2×10^{-18} Meter), tritt die elektromagnetische Reaktion wesentlich häufiger auf als die schwache. Für kleinere Abstände sind beide Reaktionen etwa gleich häufig – die beiden Kräfte sind zur elektroschwachen Kraft vereinheitlicht. Für noch kleinere Abstände sollten sich alle vier Naturkräfte zu einer Urkraft vereinigen, die am Beginn des Universums unmittelbar nach dem Urknall gewirkt hat (unten).

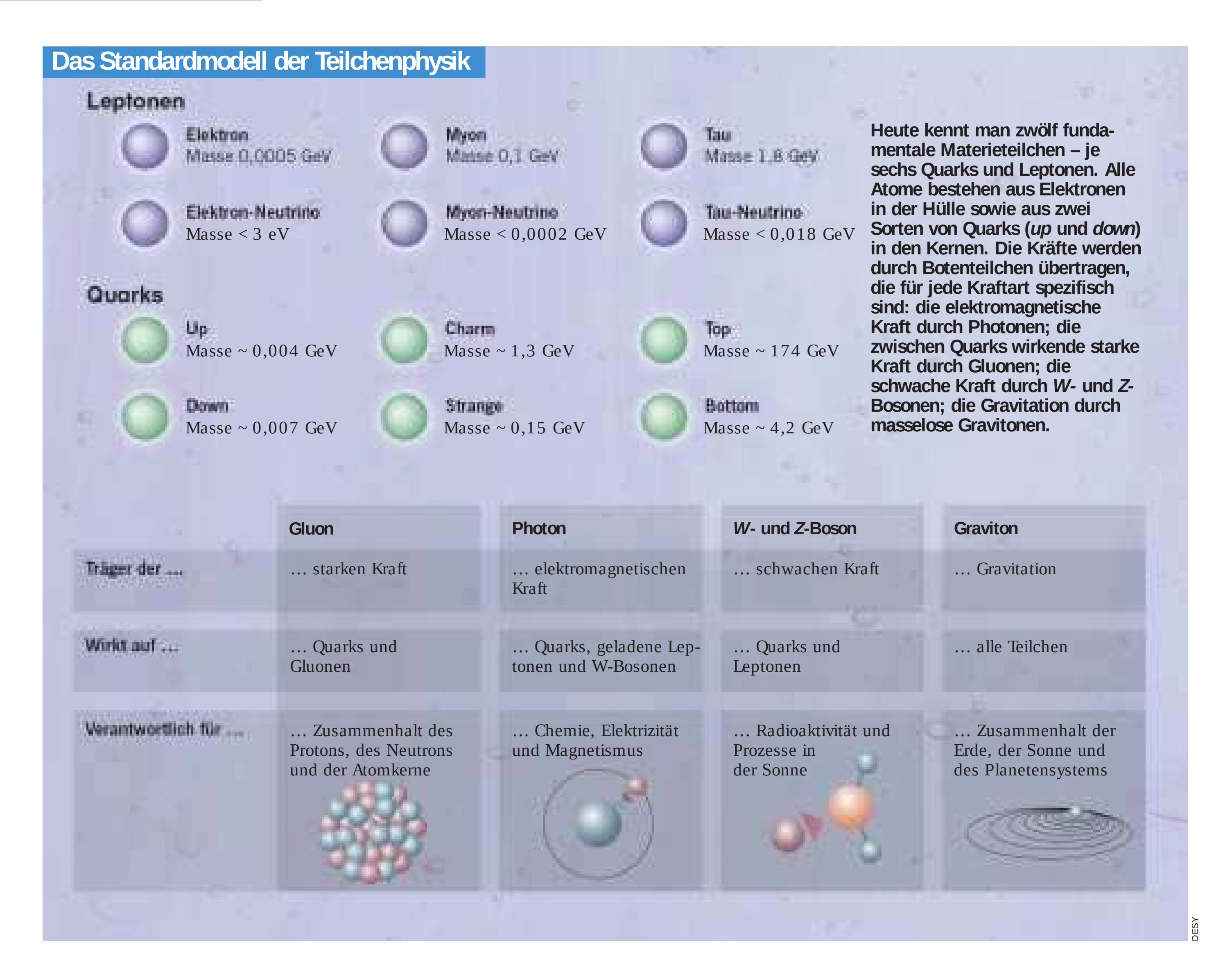
nach ist dieser Zustand dafür verantwortlich, dass Quarks und Gluonen im Proton „eingesperrt“ sind, also niemals als freie Teilchen beobachtet werden können.

Hera lieferte noch eine weitere große Überraschung: Die Experimentatoren hatten eigentlich erwartet, dass bei den gewaltigen Kollisionen im Beschleuniger mit hohen Impulsüberträgen die Protonen zumeist in eine Unzahl neuer Teilchen zerbersten. In etwa 15 Prozent der Stöße blieb das Proton jedoch unversehrt, obwohl eine heftige Wechselwirkung stattgefunden hatte. Wie aber kann ein Proton den Zusammenstoß überstehen, wenn mit aller Wucht ein Quark herausgeschlagen wird? Dies erscheint zunächst gänzlich unverständlich. Ursache ist offenbar eine außergewöhnliche Eigenschaft der starken Kraft, die uns helfen sollte zu verstehen, warum die Quarks und Gluonen im Proton „eingesperrt“ bleiben.

Die Entdeckung solcher Ereignisse hat zu einer intensiven Zusammenarbeit zwischen Theoretikern und Experimentalphysikern geführt. Beide Experimente an Hera, H1 und Zeus, wurden verändert, um die Messungen zu noch kleineren Impulsüberträgen ausdehnen und die gestreuten Protonen besser untersuchen zu können. Die Theoretiker versuchen zunächst mit Hilfe von Modellvorstellungen, die gefundene hohe Dichte der Gluonenabstrahlung im Streuprozess zu beschreiben. Dies ist inzwischen recht weit fortgeschritten. Und vielleicht wird man bald verstehen können, wie die starke Gluonenstrahlung dafür sorgt, dass Quarks und Gluonen nicht als freie Teilchen aus dem Streuprozess hervorgehen und die Protonen intakt bleiben.

Dem Geheimnis der Kräfte auf der Spur

Fassen wir noch einmal zusammen: Die Hera-Experimente haben mit Elektronen als Sonden die Struktur des Protons und die fundamentalen Naturkräfte mit bisher unerreichter Auflösung unter die Lupe genommen. In dem erstmals der Messung zugänglichen Bereich verhalten sich die schwache und die elektromagnetische Kraft genau so, wie vom Standardmodell der Teilchenphysik vorhergesagt: Bei großen Abständen sind ihre Stärken gänzlich verschieden, und dennoch haben sie einen gemeinsamen Ursprung – der Unterschied rührt vom gro- ▶



ßen Massenunterschied der Botenteilchen her. Die Theorie der starken Kraft (die Quantenchromodynamik) wurde bei kleinen Abständen genauestens bestätigt. Die Struktur des Protons erwies sich als sehr komplex, weil bei kleinen Impulsen die Dichte von Quarks und Gluonen sehr hoch ist. Auch gehen die Protonen aus dem Streuprozess unerwartet häufig unverändert hervor. Die beiden letzten Beobachtungen stellen die fundamentale Frage „Warum sind Quarks und Gluonen im Proton gefangen?“ in einer gänzlich neuen Weise.

Schon einmal hat die Untersuchung der Abstrahlung von Botenteilchen zu völlig neuen Erkenntnissen in der Physik geführt. Im Jahre 1900 versuchte der Physiker Max Planck, die beobachtete Strahlungskurve eines so genannten Schwarzen Körpers mit einer einzigen Formel zu beschreiben. Dies gelang ihm erst, als er annahm, die Energie der elektromagnetischen Strahlung könne sich nur in diskreten Schritten erhöhen. Dieser Gedankengang markiert den Beginn der Quantenmechanik. Dann dauerte es noch mehr als ein halbes Jahrhundert, bis mit der Quantenelektrodynamik die elektromagnetische Strahlung geladener Teilchen quantenmechanisch berechnet werden konnte. Der gleiche Formalismus und die gleichen Rechenmethoden erlauben uns heute, im Rahmen der Quantenchromodynamik die Strahlung von Quarks und Gluonen bei kleinen Abständen zu berechnen. Die Ergebnisse von Hera könnten uns nun helfen, die QCD-Strahlung auch bei großen Abständen zu verstehen – und damit auch die Frage nach der Struktur des Protons und der Existenz freier Quarks zu beantworten.

Die Frage nach dem Verständnis der starken Kraft bei großen Abständen und dem Zusammenhalt der Quarks und Gluonen im Proton ist eine neue Facette der uralten Suche nach den kleinsten Bausteinen der Materie. Der Weg vom Kristall ins Innere der Atome bis hin zu den Quarks und Gluonen führt uns im bislang letzten Schritt zu elementaren Teilchen, an deren Existenz kein Zweifel besteht, die aber voraussichtlich nie isoliert beobachtet werden können.

Literaturhinweise

Vorstoß in den Mikrokosmos. Spektrum der Wissenschaft, Digest 1/2001.

Der geheimnisvolle Spin des Nukleons. Von Klaus Rith und Andreas Schäfer, Spektrum der Wissenschaft, September 1999, S. 28.

Reise ins Innerste der Materie. Mit Hera an die Grenzen des Wissens. Von Pedro Waloschek. Stuttgart 1991.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie auch unter ***www.spektrum.de/aktuelleshefte.html***

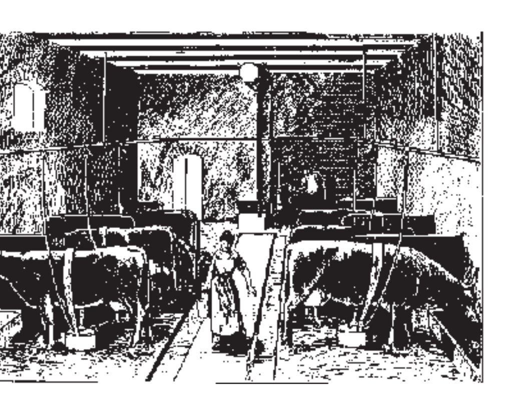


Leuchtendes Blei

Einen neuen wichtigen Beitrag zu der Kunde von den merkwürdigen Lichtstrahlen, die von gewissen Mineralien ausgesandt werden und zunächst von dem Pariser Chemiker Becquerel an der Pechblende entdeckt worden sind, haben die deutschen Gelehrten Hofmann und Strauss geliefert. Sie haben aus verschiedenen Mineralien, wie Pechblende ... einen Körper herausgezogen, der in seinen chemischen Eigenschaften durchaus dem Blei gleicht. ... Er unterscheidet sich nur durch die auffallende Erscheinung, dass er in völliger Dunkelheit auf die photographische Platte wirkt und ein Licht aussendet, das eine Linie im violetten Theile des Spectrums erzeugt. Diese Linie ist ihrer Lage nach verschieden von derjenigen, die vom glühenden Blei im Spectrum hervorgerufen wird, und aus diesem Grunde nehmen die beiden Forscher an, dass in dem Körper noch ein bisher unbekanntes Element enthalten sei. *(Elektrotechnischer Anzeiger, Nr. 19, XVIII. Jg., März 1901, S. 634)*

Gaillard's lautsprechendes Telephon

Der Apparat ist hauptsächlich für solche Zwecke bestimmt, wo gewöhnliche Telephone infolge Uebertönung von dem Geräusch resp. Lärm der Umgebung eine unzureichende Intensität der Wiedergabe besitzen. Das auf der Pariser Welt-Ausstellung an verschiedenen Stellen praktisch im Betriebe vorgeführte Modell ... ist hauptsächlich für kurze Linien, beispielsweise für lokale Telephonanlagen innerhalb von Fabriken etc., bestimmt. Die Lautstärke ist derart, dass man das vom lautsprechenden Telephon Reproduzierte in einem grossen Raum überall deutlich wahrnehmen kann. ... Das Gaillard'sche Telephon ist besonders zum Uebertragen von Aufträgen, beispielsweise aus einem Bureau nach der Werkstatt, geeignet. *(Der Mechaniker, Nr. 6, 9. Jg., 20. März 1901, S. 66)*



Neue Maschine zum Kühemelken

Die Vorrichtung besteht aus einer Saugpumpe, einem Röhrensystem und den becherartigen, aus Glas gefertigten Saugnäpfen, welche an das Euter angelegt werden und dann, sobald die Pumpe in Thätigkeit tritt, daran haften bleiben. Von den Saugern führt ein Rohr zu dem am Erdboden stehenden Sammelgefäß, in welchem durch die weiteren Röhrenleitungen und die mit der Hand bethätigte Saugpumpe eine Luftverdünnung hervorgerufen wird. Indem sich letztere bis in die kleinen Saugnäpfe fortpflanzt, treibt der innere Luftdruck die Milch aus dem Euter und in das Sammelgefäß. Ein Mann oder Knabe zur Bewegung der Pumpe und ein Mädchen zum Entleeren der Sammelgefäße und Fortschaffen der Milch genügen, das Melken einer größeren Anzahl Kühe zu besorgen. *(Das Neue Universum, XXII. Jg., 1901, S. 154–155)*

Murchlands Melkmaschine

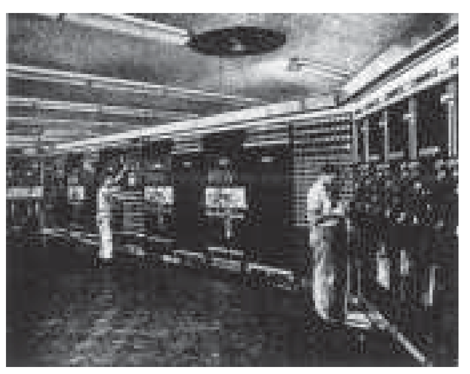


Nylon hilft feinste Röhren herstellen

Einem Bericht zufolge entwickelte der schwedische Forscher Rolf Gezelius ein Verfahren zur Herstellung feinster Metallröhren unter Verwendung von Nylonfasern. Danach werden die Fasern zunächst in die gewünschte Form gebracht und dann elektrolytisch mit Metall überzogen. Anschließend werden die Fasern aus der Röhre entfernt. Auf diese Weise soll es gelingen, Röhren mit einer bisher unerreichbar dünnen Wandstärke zu erzeugen. *(Orion, 6. Jg., Nr. 6, 2. Märzheft 1951, S. XLV)*

Denkende Maschinen

Die Berechnung komplexer mathematischer Probleme, zu deren Lösung der Mensch Wochen, ja Monate benötigt, wird schnell und genau von neuartigen, elektronischen Maschinen ausgeführt. ...
Die große Büromaschinenfabrik IBM in New York hat eine Maschine in Betrieb, die die relative Position des Mondes zur Erde berechnen kann. Eine Flugzeugfabrik in Texas benützt eine derartige Rechenmaschine für einen Großteil der schwierigen aerodynamischen Berechnungen. ... Diese Roboter arbeiten pausenlos. Versieht man sie am Abend mit einem ausreichenden Vorrat mathematischer Probleme auf Lochstreifen, dann arbeiten sie emsig die ganze Nacht. ... Wissenschaftler werden vielleicht in naher Zukunft ihre mathematischen Aufgaben ausschließlich auf „denkenden Maschinen" in der Größe eines Schreibtisches lösen, die man in der Wohnung oder im Büro aufstellen kann. *(Naturwissenschaftliche Rundschau, 4. Jg., Heft 3, S. 132)*



Frontansicht der Elektronen-Rechenmaschine

Von der Nautik zur Astronautik

Das erste Ziel der Gesellschaft für Weltraumforschung ist eine sogenannte Außenstation, ein künstlicher Satellit kurz außerhalb der Erdatmosphäre, der es gestatten würde, die Erkenntnisse der kosmischen Physik zu erweitern, und der auch zu Ausnutzung der kosmischen Strahlung für Energiezwekke benutzt werden könnte. Erst später kann an eine wirkliche Raumfahrt mit Raketenschiffen gedacht werden, für die ganz neuartige Gesetze der Nautik gelten müssen. *(Das Industrieblatt, 51. Jg., Nr. 3, 25. März 1951, S. 80)*

Muskeln, Gene und Leistungssport

Das beste Training verhilft kaum zum Sprung in die Weltelite, wenn die individuellen natürlichen Voraussetzungen nicht stimmen. Werden einmal gentechnisch aufgerüstete Superathleten die Wettkämpfe bestreiten?

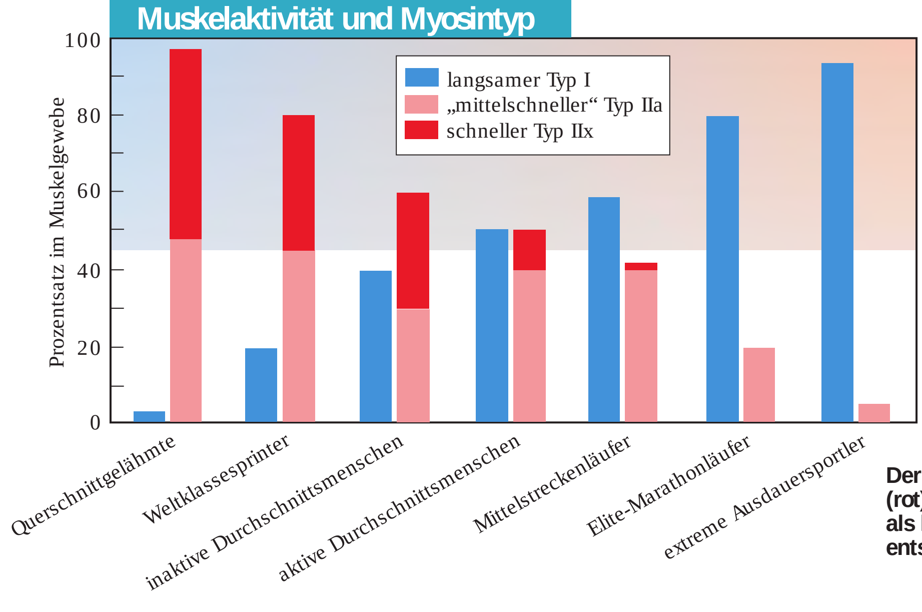
Von Jesper L. Andersen, Peter Schjerling und Bengt Saltin

„Auf die Plätze!“ Es wird still im Stadion von Sydney. Rund 110000 Zuschauer starren gebannt auf die sechs schnellsten Olympioniken. Wer wird an diesem 24. September 2000 wohl die Goldmedaille erringen? Die Läufer kauern am Start für das 100-Meter-Finale. „Fertig!“ Der Startschuss zerreißt die Stille. Die Menge tobt, als die Sprinter die Startblöcke verlassen. Lediglich 9,87 Sekunden später steht der Gewinner fest: Maurice Greene aus Los Angeles.

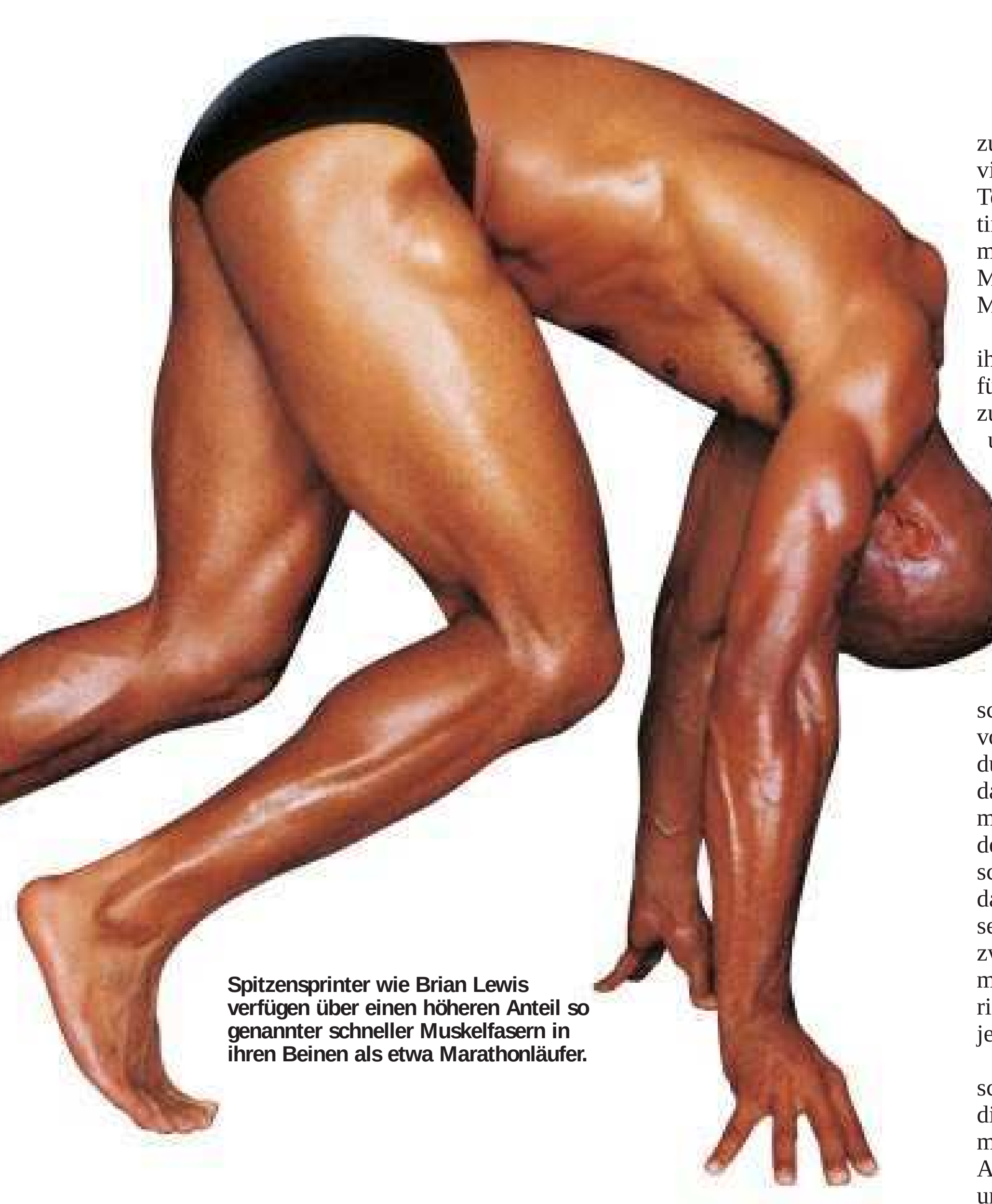
Warum, ist man geneigt zu fragen, steht nun Greene, der zugleich den Weltrekord von 9,79 Sekunden hält, und nicht der zweitplatzierte Ato Boldon ganz oben auf dem Treppchen? Schließlich haben sich beide Sportler über Jahre unermüdlich und mit gleichermaßen hartem Training auf diesen Moment vorbereitet. Die Antwort ist keineswegs einfach; angefangen von der mentalen Verfassung des Athleten am Wettkampftag bis hin zum Design seiner Schuhe spielen viele Faktoren eine Rolle. Gerade für Sprinter ist außerdem auch reine Muskelkraft entscheidend. Bei Weltrekordler Greene konnte die Beinmuskulatur, vor allem am Oberschenkel für die kurze Zeit des Sprints etwas mehr Kräfte freisetzen als bei seinen Konkurrenten.



Was zeichnet solche Siegermuskeln aus? An Fragen wie dieser arbeiten weltweit verschiedene Laboratorien, darunter auch unsere Gruppe an verschiedenen Institutionen in Kopenhagen. Allgemeiner gefasst geht es um den Auf-, Ab- und Umbau menschlicher Muskeln durch Gebrauch oder Nichtgebrauch. Ein zentrales Problem beim Sport ist, inwieweit sich Muskeln verändern können, um zum Beispiel den Anforderungen eines Marathons oder eines Sprints gerecht zu werden. Die Untersuchungen der letzten Jahre gewähren Einblick in die Hintergründe sportlicher Spitzenleistungen und beleuchten auch eine weitere wichtige Frage: Werden unsere besten Leichtathleten, Schwimmer, Radrennfahrer und Skilangläufer bereits als Sieger geboren? Oder kann praktisch jedermann durch Training und Willensstärke zum Champion werden?



Der „rasante“ Fasertyp menschlicher Muskeln (rot) verkürzt sich rund zehnmal schneller als langsame Typ (blau), der für die Ausdauer entscheidend ist.



Spitzensprinter wie Brian Lewis verfügen über einen höheren Anteil so genannter schneller Muskelfasern in ihren Beinen als etwa Marathonläufer.

HOWARD SCHATZ; SCHATZ / ORNSTEIN STUDIO

Im menschlichen Körper ist die Skelettmuskulatur sowohl der massigste als auch der anpassungsfähigste Gewebetyp. Konsequentes Krafttraining kann einen Muskel auf das Doppelte oder Dreifache vergrößern, wohingegen dieser bei Nichtgebrauch, etwa während eines Weltraumaufenthaltes, binnen zwei Wochen unter Umständen um ein Fünftel schrumpft. Die zu Grunde liegenden biochemischen und biomechanischen Vorgänge sind äußerst komplex, aber nach jahrzehntelanger Forschung mittlerweile in gewissem Rahmen geklärt.

Was man beispielsweise am Oberarm als Bizeps fühlt, ist im Prinzip nichts anderes als ein Paket gebündelter lang gestreckter Zellen, zusammengehalten durch kollagenes Bindegewebe. Beim Menschen enthält eine einzelne solche Skelettmuskelzelle, eine Muskelfaser, mehrere tausend Kerne mit Erbmaterial und kann bei einer Stärke von nur etwa einem zehntel Millimeter bis zu 30 Zentimeter lang werden. Das Innere der Riesenzelle füllen tausende parallel gelagerter Proteinschnüre; diese so genannten Myofibrillen erstrecken sich von einem Ende der Faser bis zum anderen. Auf Nervenimpulse hin ziehen sie sich zusammen, verkürzen so ihre Zelle und den Muskel. Die dafür zuständigen motorischen Nervenzellen, die Motoneuronen, steuern jeweils eine Gruppe von Fasern: in Beinmuskeln zum Beispiel einige Hundert bis zu über Tausend. Dagegen versorgt ein Motoneuron in fein steuerbaren Muskeln, wie sie etwa zur Bewegung der Finger gebraucht werden, höchstens einige wenige Fasern.

Das Geheimnis der Muskelbewegung steckt vor allem in den Myofibrillen. Sie bestehen aus winzigen aneinander gereihten Kammern, den Sarkomeren. Wenn sich der Muskel kontrahiert, agieren darin hauptsächlich zwei Sorten fadenförmiger Proteine, Myosin und Aktin. Die Proteine selbst ziehen sich nicht zusammen. Der Mechanismus ähnelt vielmehr im Prinzip einem altmodischen Teleskop, das eingefahren wird: Die Aktinfäden, die von beiden Enden der Kammer wie Borsten zwischen das zentrale Myosinbündel ragen, werden zu dessen Mitte gezogen (Abbildung Seite 72).

Muskelfasern unterscheiden sich in ihrer Kontraktionsgeschwindigkeit. Hierfür ist nun die chemische Zusammensetzung des Myosinmoleküls entscheidend, und zwar speziell seine größte Teilkomponente, die so genannte schwere Kette. Sie tritt beim Erwachsenen in drei unterschiedlichen Ausprägungen auf: den Isoformen I, IIa und IIx (auch IId genannt). Diese Unterteilung gilt dann auch für die entsprechenden Muskelfasern: Enthalten sie eine der beiden Formen vom Typ II, spricht man von schnellen Fasern, bei Typ I hingegen von langsamen. Diese Klassifizierung ist durchaus berechtigt, wenn man bedenkt, dass der träge Fasertyp sich etwa zehnmal langsamer verkürzt als der schnellste der schnellen, nämlich Typ IIx. Die Geschwindigkeit von Typ-IIa-Fasern liegt dazwischen. Neben den drei reinen Fasertypen gibt es auch Mischfasern mit je zwei unterschiedlichen Myosin-Isoformen. Ihre funktionellen Eigenschaften richten sich im Allgemeinen nach dem jeweils dominanten Myosintyp.

Beeinflusst wird die Kontraktionsgeschwindigkeit der Muskelfasern durch die unterschiedliche Geschwindigkeit, mit der an der schweren Myosinkette Adenosintriphosphat (ATP) gespalten und damit verbraucht wird. Diese Substanz ist der universelle Energielieferant aller Zellen. Da Typ-I-Fasern ihr ATP langsamer spalten und vorwiegend über einen Sauerstoff verbrauchenden Stoffwechselweg neu gewinnen, eignen sie sich vor allem für Ausdauersport wie Langstreckenlaufen, Radfahren oder Schwimmen. Schnelle Fasern hingegen mit ihrem hohen Verbrauch ermüden rascher, können aber kurzfristig über einen sauerstofflosen – anaeroben – Stoffwechselweg mehr Reserven mobilisieren. Ihnen kommt daher eine Schlüsselfunktion bei Kurzzeitbeanspruchungen wie Gewichtheben oder Sprinten zu.

Ein gesunder erwachsener Durchschnittsmensch verfügt etwa über ebenso viele langsame wie schnelle Fasern, zum Beispiel im vorderen Oberschenkelmuskel, dem vierköpfigen Schenkelstrecker. Allerdings bestehen auch große individuelle Unterschiede im Aufbau typgleicher Muskeln. So fanden wir im Oberschenkelmuskel eine Spanne von nur 19 Prozent langsamen Fasern bis hin zu be-

merkenswerten 95 Prozent – ideal für den Marathon, aber schlecht für den Hundertmeterlauf (Grafik Seite 70).

Muskelfasern, also Muskelzellen, sind außer Stande, sich durch Zellteilung zu vermehren. Gehen sie durch Krankheit oder Alter verloren, können keine neuen mehr entstehen (siehe Kasten auf Seite 74). Ein Muskel kann daher nur an Masse zulegen, wenn sich seine vorhandenen Fasern verdicken. Und das geschieht vorwiegend durch Produktion zusätzlicher Myofibrillen. Angeregt wird diese Produktion durch körperliche Anstrengung, durch Training beispielsweise. Es belastet Sehnen und andere mit dem Muskel verbundene Strukturen mechanisch. Über eine Kaskade von Signalproteinen werden dadurch letztlich unterschiedliche Gene aktiviert werden, die dann wiederum die vermehrte Bildung von kontraktilen Proteinen veranlassen. Dabei handelt es sich zumeist um Myosin und Aktin für den Aufbau neuer Myofibrillen.

Eine vehement gesteigerte Proteinsynthese verlangt aber in Muskelfasern nach mehr Zellkernen – auch um ein gewisses Verhältnis zwischen dem dann stark wachsenden Zellvolumen und der Anzahl der Kerne aufrecht zu erhalten. Da sich jedoch weder diese Kerne noch die Muskelfasern selbst teilen können, greift der Organismus auf teilungsfähige Satellitenzellen zurück. Diese liegen den Muskelfasern außen an oder wandern eventuell auch in Form anderer Stammzellen zu. Bei Bedarf können sie mit ihrem großen Nachbarn verschmelzen und so deren Dickenwachstum durch „Kernspende“ unterstützen.

Diese Quelle neuer Zellkerne sprudelt bemerkenswerterweise immer dann besonders stark, wenn hartes Muskeltraining die Fasern strapaziert hat. Einer gängigen Theorie zufolge entstehen nämlich dabei winzige Risse, so genannte Mikroläsionen, die wie ein Magnet auf die spinnenförmigen Satellitenzellen wirken. Diese wandern zu der verletzten Region und beginnen dort, Proteinmaterial zur Reparatur herzustellen. Außerdem teilen sie sich. Einige von ihnen verschmelzen mit den Fasern, andere verbleiben weiterhin als Satelliten außerhalb. Die gespendeten Zellkerne, die übrigens von den bereits enthaltenen nicht zu unterscheiden sind, schaffen die Voraussetzung zur groß angelegten Produktion von weiteren Proteinen und damit von zusätzlichen Myofibrillen in der Faser.

Für die Produktion greift die Muskelzelle, genau wie jede andere Zelle, auf die Bauanweisung der jeweils zuständigen Gene im Zellkern zurück. Von dort geht eine Abschrift an die Proteinfabriken im Zellplasma. Fachleute bezeichnen die Schritte vom Gen zum Protein als Expression, als Ausprägung.

Der Stoff, aus dem Muskeln sind

Das wissenschaftliche Interesse an Skelettmuskeln konzentriert sich unter anderem auf zwei, besonders auch für Sportler interessante Fragen: Wie können Muskeln durch Training und andere Reize aufgebaut werden, und wie kann sich dabei ein Fasertyp in einen anderen umwandeln?

Die Vorgeschichte reicht bis in die sechziger Jahre zurück. Damals zeigten mehrere Wissenschaftler, unter ihnen der Medizinnobelpreisträger von 1963 John C. Eccles von der australischen National-Universität in Canberra, dass sich bei tierischen Skelettmuskeln langsame und schnelle Fasertypen ineinander umwandeln lassen. Die Forscher bedienten sich dabei hauptsächlich der so genannten Kreuz-Innervation. Sie vertauschten die Nerven zwischen einem insgesamt langsamen und einem insgesamt schnellen Muskel. Verblüffenderweise kehrten sich deren Kontraktionseigenschaften um. Ferner reizten die Forscher jeweils einen Muskel elektrisch über längere Zeit, um ihn zu aktivieren. Oder sie durchtrennten seinen Nerv, um das Gegenteil zu erreichen.

In den siebziger und achtziger Jahren verschob sich dann der Schwerpunkt auf menschliche Muskulatur und dort vor allem auf die Frage, wieweit auch unsere Muskelfasern ihre Größe und Eigenschaften ändern können. Diese allgemein als Plastizität bezeichnete Fähigkeit offenbart sich im Extrem nach einer Quer-

Literaturhinweise

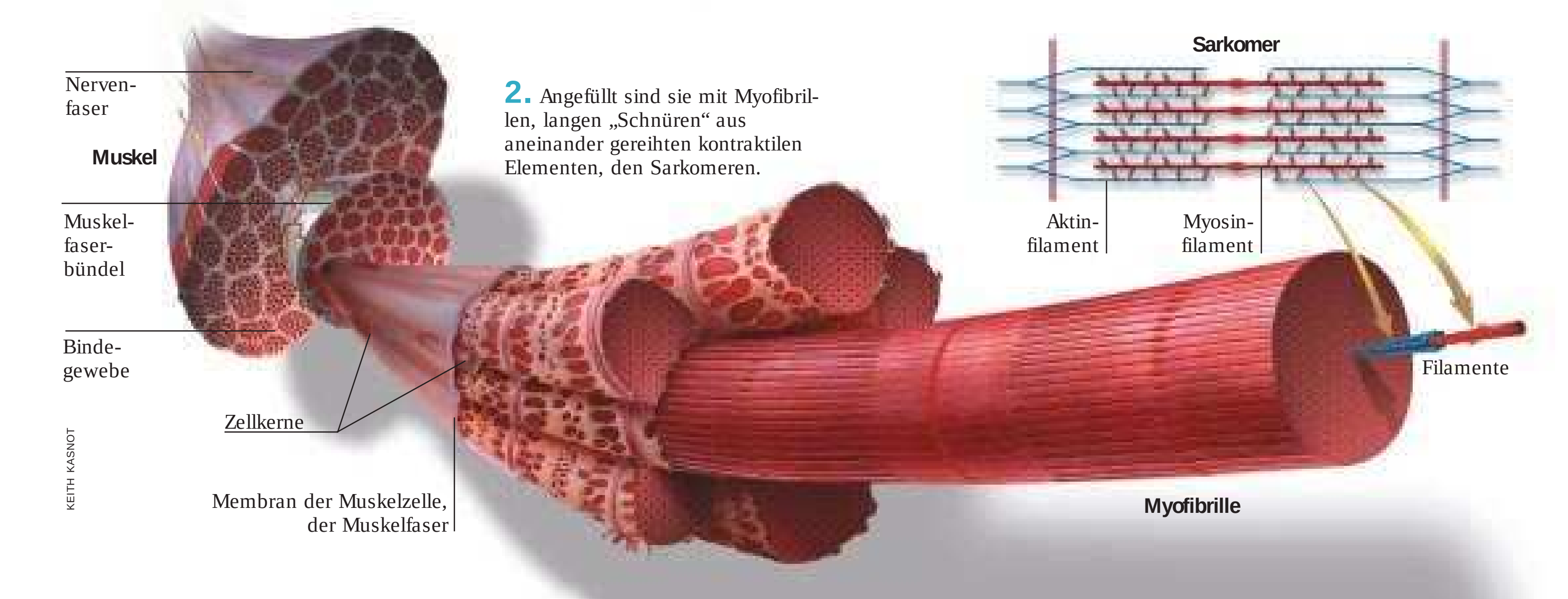
Muskulärer Energiestoffwechsel und Sport. Von H. Wackerhage und D. Leyk. Verlag Sport und Buch Strauß, Köln 2000.

Die genetische Kraftspritze. Von G. Zorpette in: Spezial: Der High-Tech-Körper, S. 80, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg 1999.

Molekulare Muskelmaschinen. Von S. Galler in: Spektrum der Wissenschaft, Februar 2001, S. 36.

Weblinks unter: ***www.spektrum.de/aktuellesheft.html***

Muskelarchitektur



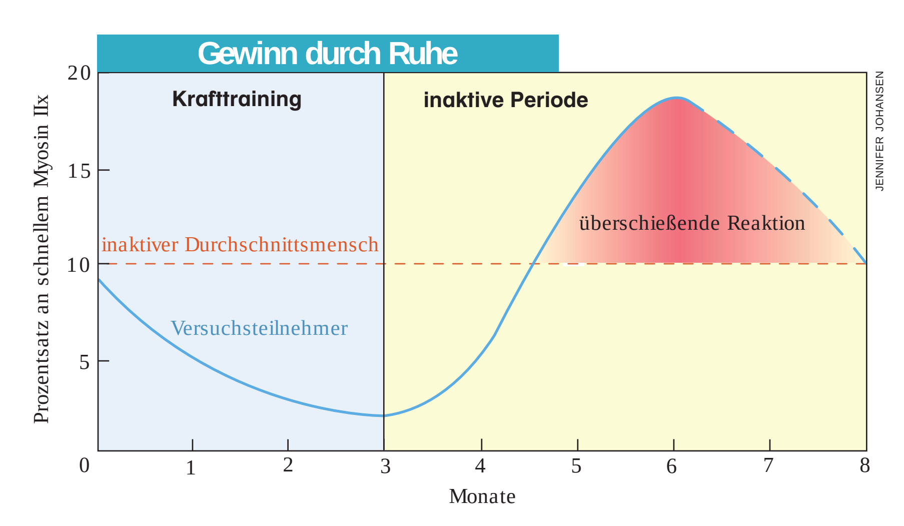
1. Ein Skelettmuskel besteht hauptsächlich aus lang gestreckten Riesenzellen, den Muskelfasern.

2. Angefüllt sind sie mit Myofibrillen, langen „Schnüren“ aus aneinander gereihten kontraktilen Elementen, den Sarkomeren.

3. Diese kleinen Gefache enthalten die Schlüsselstrukturen der Muskelzellen: parallele Proteinfäden aus Myosin und Aktin. Beide gleiten bei einer Muskelbewegung teleskopartig aneinander vorbei.

schnittlähmung. Die betreffenden Muskeln schwinden dann rapide, weil die fehlenden Nervenimpulse sie untätig machen. Etwas unerwartet verändert sich aber auch der Muskeltyp, und zwar so, dass sich der Anteil der langsamen Myosinvariante zu Gunsten der schnelleren deutlich verringert.

Wie wir unter anderem nachgewiesen haben, enthält nach fünf bis zehn Jahren Lähmung ein bestimmter „Untermuskel" des vierteiligen Schenkelstreckers – der äußere Schenkelmuskel – oft fast kein langsames Myosin mehr, während sonst durchschnittlich die Hälfte seiner Zellen zum langsamen Typ gehört. Daraus schlossen wir, dass es einlaufender elektrischer Impulse bedarf, damit Muskelzellen ihr langsames Myosin stets nachproduzieren können. Tatsächlich vermag dann beispielsweise eine künstliche Elektrostimulation der gelähmten Muskeln den Anteil langsamen Myosins wieder etwas zu erhöhen.



Während des Krafttrainings nimmt das schnelle Myosin-IIx erwartungsgemäß ab; danach kehrt es aber nicht einfach auf seinen Ausgangswert zurück, sondern verdoppelt seinen Anteil im Laufe einer dreimonatigen Ruhephase. Für einen Sprinter, der ja einen hohen Anteil an IIx-Fasern braucht, heißt das: vor Wettkämpfen das Trainingspensum reduzieren.

Auch in gesunden Muskeln wandeln sich Fasertypen um. Beispielsweise verändert wiederholtes schweres Krafttraining – etwa das Arbeiten mit Gewichten – die Anzahl schneller IIx-Fasern: Sie wandeln sich in mittelschnelle IIa-Fasern um. In ihren Zellkernen wird dann anstelle des IIx-Gens das IIa-Gen abgelesen. Absolviert jemand ein solches Krafttraining mindestens vier Wochen lang, dann wandeln sich sogar alle schnellen in mittelschnelle Fasern um. Gleichzeitig produzieren diese vermehrt Proteine, sodass die einzelnen Muskelzellen dicker werden.

Anfang der neunziger Jahre machte Geoffrey Goldspink vom Royal Free Hospital in London den Vorschlag, die Expression des IIx-Gens als eine Art Grundeinstellung zu betrachten. Die Ergebnisse verschiedener Studien stützten seine Hypothese: Zum einen weisen Personen, die sehr viel sitzen, einen höheren Gehalt an Myosin IIx in ihren Muskeln auf als sportlich aktive Menschen; zum anderen wächst die Konzentration von Myosin IIa mit der Muskelaktivität.

Was geschieht aber nach Beendigung einer Trainingsperiode? Schalten die Muskelzellen dann wieder allmählich auf ihre IIx-Grundeinstellung um? Die Antwort lautet grundsätzlich ja, aber auf einem Umweg, wie unsere Studie mit neun jungen inaktiven Dänen zeigte.

Zu Beginn entnahmen wir eine erste Gewebeprobe aus dem äußeren Teil des Schenkelstreckers. Der Anteil an schnellem Myosin Ilx betrug darin durchschnittlich neun Prozent. Die zweite Entnahme erfolgte nach einem dreimonatigen Krafttraining zur Stärkung des Oberschenkelstreckers, eine dritte dann ein Vierteljahr nach Trainingsende, ab dem die Versuchspersonen ihre alte Lebensweise wieder aufgenommen hatten. Erwartungsgemäß reduzierte sich der Anteil der schnellen IIx-Isoform während des Krafttrainings in dem Muskel, und zwar von durchschnittlich neun auf etwa zwei Prozent. Zu unserer Überraschung stieg er aber nach dreimonatiger Inaktivität nicht nur wieder bis zum Ausgangswert, sondern weit darüber hinaus: auf durchschnittlich 18 Prozent (siehe Diagramm auf dieser Seite oben). Zwar haben wir danach keine Proben mehr entnommen, doch gehen wir davon aus, dass der Gehalt an Myosin-IIx schließlich nach ein paar weiteren Monaten auf seinen „Ruhewert" von rund neun Prozent zurückkehrt.

Von langsamen zu schnellen Fasern?

Noch fehlt uns eine schlüssige Erklärung für diese überschießende Reaktion. Es lassen sich jedoch einige praktische Schlussfolgerungen aus dem Experiment ziehen. Zum Beispiel wären Sprinter, die den Anteil ihrer schnellsten Muskelfasern massiv erhöhen wollen, gut beraten, den vorhandenen Anteil zunächst durch Training zu vermindern, um dann während einer Ausklingphase auf die Verdopplung zu warten. Tatsächlich reduzieren viele Sprinter ihr Trainingsprogramm vor einem Wettkampf einfach aus Erfahrung, ohne dabei die physiologischen Hintergründe zu kennen.

Die gegenseitige Umwandlung der beiden schnellen Muskelfaser-Typen IIa und IIx erfolgt also je nach körperlicher Aktivität. Ist aber auch eine Konversion von langsamen in schnelle Fasern – von Typ I zu Typ II – und umgekehrt – möglich? Zahlreiche frühere Experimente hierzu an menschlichen Muskeln waren negativ verlaufen. Erst zu Beginn der neunziger Jahre entdeckten wir erste Hinweise, dass sich durch hartes Training auch langsame in mittelschnelle Fasern vom Typ IIa umwandeln lassen. Unsere Probanden während einer dreimonatigen Studie waren Elite-Sprinter. Sie absolvierten ihr normales Trainingsprogramm.

Etwa zur selben Zeit präsentierten Mona Esbörnsson und ihre Kollegen vom Karolinska-Institut in Stockholm ähnliche Ergebnisse aus einer Untersuchung mit zwölf Teilnehmern, die keine Hochleistungssportler waren. Dies lässt darauf schließen, dass ein intensives Training mit Gewichten, ergänzt um weitere anaerobe Übungen, wie beim Training von Elite-Sprintern nicht nur eine Umwandlung von schnellen Fasern in mittelschnelle bewirkt, sondern auch von langsamen Fasern in mittelschnelle.

Ist aber auch das Umgekehrte beim Menschen machbar? Lassen sich also durch spezielle Übungen mittelschnelle in langsame Fasern verwandeln? Diese Frage konnte bisher noch keine Untersuchung eindeutig beantworten. Das schließt aber die Möglichkeit einer solchen Umwandlung nicht aus. Wie erwähnt besitzen Top-Athleten in Ausdauersportarten generell einen bemerkenswert hohen Anteil an langsamen Fasern in ihren Hauptmuskelpaketen – bis zu 95 Prozent. Unklar ist aber weiterhin, ob diese Menschen mit zahlreichen Typ-I- ▶

Fasern geboren wurden und sich dementsprechend zum Ausdauersport hingezogen fühlten oder ob sie sich den hohen Anteil allmählich erarbeitet haben. Wir wissen nur, dass eine Umwandlung von mittelschnellen in langsame Fasern, wenn sie denn möglich ist, deutlich länger dauert als die von schnellen in mittelschnelle Fasern.

Vielleicht haben ja begnadete Marathonläufer oder Sprinter wirklich von Geburt an eine außergewöhnliche Muskelzusammensetzung: Dann würden sich künftige Langstreckler natürlich durch eine verhältnismäßig hohe Typ-I-Faserdichte auszeichnen und künftige Sprinter durch eine geringe. Wer sich aber trotzdem zur Kurzstrecke hingezogen fühlt, sollte nicht aufgeben. Wissenschaftler haben nämlich herausgefunden, dass sich bei entsprechendem Krafttraining die Typ-II-Fasern doppelt so stark verdicken wie die anderen. Deshalb vergrößert ein Training mit Gewichten beträchtlich die Fläche, die Typ-II-Fasern auf dem Querschnitt eines Muskels einnehmen, ohne dass sich dabei das Zahlenverhältnis von schnellen zu langsamen Fasern verändert. Gerade das Flächenverhältnis zwischen beiden ist aber für die funktionellen Eigenschaften des Muskels entscheidend: je größer die von schnellen Fasern abgedeckte Querschnittsfläche, desto schneller ist der ganze Muskel. Somit hat zumindest jeder Sprinter die Möglichkeit, die Eigenschaften seiner Muskulatur durch Krafttraining in dieser Hinsicht zu optimieren.

Interessant sind hierzu ältere Befunde von Michael Sjöström und seinen Mitarbeitern an der schwedischen Universität Umea. Sie betrachteten die Querschnittsflächen der drei Hauptfaserarten im äußeren Schenkelmuskel. Die jeweiligen Mittelwerte einer Gruppe von Marathonläufern erwiesen sich als nahezu gleich groß; bei einer Gruppe von Sprintern unterschieden sich die Werte. Wir selbst ermittelten ganz ähnliche Werte bei einer anderen Sprintergruppe.

Alles in allem ist die Umwandlung von IIa- zu I-Fasern wohl nur schwer durch Training zu erreichen, aber schon in nicht allzu ferner Zukunft könnte dies durch gentechnische Eingriffe möglich werden. Noch faszinierender, wenngleich nicht beruhigender ist die Vorstel-

Muskeln im Alter

Kompromiss zwischen langsam und schnell

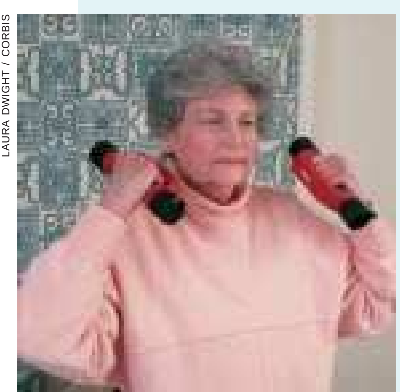
Mit zunehmendem Alter werden die Muskeln schwächer, unsere Bewegungen langsamer. Der Masseverlust ist sicherlich die auffälligste Veränderung an der Skelettmuskulatur: Er beginnt bereits im Alter von circa 25 Jahren; mit 50 sind dann etwa zehn Prozent, mit 80 rund 50 Prozent geschwunden. Schuld daran ist hauptsächlich der Abbau von Muskelfasern, von Muskelzellen also. Krafttraining vermag zwar die Masseverluste auszugleichen, jedoch nur, weil es die verbliebenen Fasern dicker werden lässt.

Bevor Fasern verloren gehen, verändert sich ihr Querschnitt. Bei jungen Menschen ist er charakteristisch vieleckig, bei älteren hingegen oft abgerundet und manchmal sogar bananenförmig. Darüber hinaus scheint Altern eine Gruppierung der Fasertypen anzustoßen: Bei jungen und mittelalten Personen bilden schnelle und langsame Typen im Muskelquerschnitt eher ein feines Mosaik, bei Senioren hingegen größere einheitliche Gruppen (siehe Schwarzweißfotos). Dies tritt auch bei jüngeren Patienten mit Erkrankungen der motorischen Nervenzellen auf.

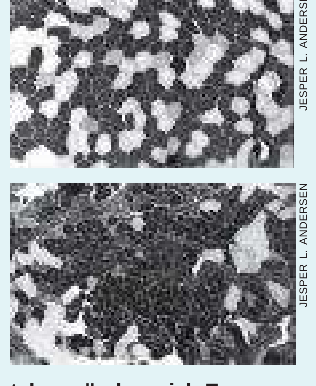
Als Ursache für die altersbedingte Gruppenbildung vermuten einige Forscher einen komplexen Prozess, der von den steuernden Nerven ausgeht. Alle von einem einzigen „Motoneuron“ innervierten Muskelzellen bilden eine so genannte motorische Einheit. Wenn mit dem Alter nun einige dieser Neuronen absterben, verbleiben ihre Muskelzellen ohne anregende Nervenimpulse; sie degenerieren und sterben ab – es sei denn eine andere Nervenzelle übernimmt die Kontrolle.

Wird aber zum Beispiel eine schnelle Muskelfaser von einem Neuron re-innerviert, das eigentlich langsame Fasern steuert, gerät sie in Konflikt. Von ihrer Entwicklung her schnell, empfängt die Faser jetzt Impulsmuster, die zu langsamen Fasern passen. Schließlich erliegt die Zelle wohl den neuen Reizen und verwandelt sich in eine langsame Faser.

Insgesamt scheint das Altern die schnellen Fasern härter zu treffen als die langsamen; damit würde sich die relative Verteilung in unseren Muskeln allmählich zu Gunsten des langsamen Typs verschieben. Diese schon lange bestehende, aber etwas umstrittene Hypothese könnte auch erklären, warum ein zehnjähriger Junge seinen Großvater im 100-m-Sprint besiegt, jedoch beim 10-km-Lauf keine Chance hat.



LAURA DWIGHT / CORBIS



JESPER L. ANDERSEN

JESPER L. ANDERSEN

Trotz Übungen mit Aerobic-Hanteln verändern sich Form und Verteilung der Muskelfasern weiterhin altersgemäß wie an dem Muskelquerschnitt zu erkennen. Rein schnelle Fasern (weiß, oben) nehmen ab.

Ein Nachweis für die relative Zunahme der langsamen Fasern im Alter gestaltet sich immer noch recht schwierig. Wir sind daher das Problem etwas anders angegangen. Unsere Versuchsgruppe bestand aus zwölf gebrechlichen Senioren mit einem Durchschnittsalter von 88 Jahren, die der Entnahme von Gewebe zustimmten. Wir wählten den äußeren Teil des Schenkelstreckers. Aus den Gewebeproben haben wir unter dem Mikroskop mit feinen Nadeln einzelne Muskelfasern herausgelöst und danach deren Myosinvarianten bestimmt. Das geschah bei immerhin 2300 einzelnen Fasern.

Das Ergebnis war einigermaßen überraschend, fanden wir doch einen rund dreißigprozentigen Anteil an „Mischfasern“ mit zwei Myosinvarianten, und zwar Typ I und IIa. Im gleichen, aber jungen Muskel sind diese Hybridfasern mit weniger als fünf Prozent aller Zellen dagegen selten.

Die Frage, ob gealterte Muskeln anteilig mehr langsame Fasern enthalten, ist somit nicht mit einem einfachen Ja oder Nein zu beantworten. Das Verhältnis zwischen rein langsamen und rein schnellen Fasern scheint sich nicht zu verschieben; stattdessen wird die Grenze zwischen den Typen eher fließend. In einem sehr alten Muskel sind etwa ein Drittel Zellen weder rein schnell noch rein langsam, sondern irgendetwas dazwischen.

lung, dass sich stumme Myosingene in unserem Erbgut aktivieren ließen. Sie stellen so etwas wie Relikte unserer evolutionären Vergangenheit dar: archivierte Pläne für Myosintypen, die es unseren fernen stammesgeschichtlichen Säugetier-Vorfahren ermöglichten, ausgesprochen schnelles Muskelgewebe aufzubauen, hilfreich etwa zur Flucht vor Raubtieren.

Wie ein Blick zurück auf die Geschichte des Sports belegt, hat immer eine Minderheit von Sportlern Dopingmissbrauch betrieben. Ständig werden neue Mittel entwickelt und in betrügerischer Absicht genutzt, sodass die Offiziellen gezwungen sind, mit Hilfe der Wissenschaft immer raffiniertere geeignete Dopingtests auszuarbeiten. Stehen erst einmal gentechnische Dopingverfahren zur Verfügung, wird das Problem ganz neue Dimensionen annehmen.

Gentherapie ist mittlerweile in den meisten Industrie-Staaten ein intensiv verfolgtes Forschungsfeld. Man verspricht sich Hilfe beispielsweise gegen Erkrankungen, die auf der mangelhaften Produktion eines körpereigenen Eiweißstoffes beruhen. Ein solcher therapeutischer Ansatz ist bereits theoretisch möglich.

Für den Transfer in die Körperzellen bestehen verschiedene Möglichkeiten. Zwar lassen sich Gene direkt in einen Muskel injizieren. Ein Teil der Zellen würde dann die neue DNA aufnehmen und eventuell auch dem eigenen Genbestand einverleiben. Da aber diese Methode bisher nicht sehr effektiv ist, nutzen Wissenschaftler im Tierexperiment oft Viren als Genfähren. Im Prinzip besteht ein Virus nur aus etwas Erbsubstanz, verpackt in einer Proteinhülle. Mit dieser „Außenhaut“ dockt das Virus an einer Zelle an und entlässt dann sein Erbgut ins Innere. Ersetzt man nun vorher virale Gene durch andere, werden genau diese in die Körperzellen eingeschleust. Virale Genfähren gelangen allerdings über die Blutbahn auch an nicht dafür vorgesehenen Stellen im Körper, wo die neuen Gene unerfreuliche Nebenwirkungen hervorrufen können. Man stelle sich nur vor, was passiert, wenn ein Gen zum massiven Muskelaufbau statt nur in der Skelettmuskulatur auch im Herzmuskel landet. Ein vergrößertes Herz hat bekanntlich negative Folgen.

Gezielteres Vorgehen ermöglicht ein anderer von Forschern verfolgter Ansatz zur Gentherapie: Dem Patienten werden Zellen eines speziellen Typs entnommen, dann im Labor mit dem gewünschten Gen bestückt und schließlich wieder in den Körper rückgeführt. Alle genannten Verfahren dürften eines Tages von unlauteren Sportlern genutzt werden, zumal sich der Missbrauch unter Umständen nur schwer aufdecken lässt. Zum einen reicht eventuell eine einzige Spritze für das genetische Doping aus, zum anderen sind die zusätzlich erzeugten Proteine, wenn sie den natürlichen entsprechen, nicht davon zu unterscheiden. Die einzige klare Nachweismöglichkeit liegt dann in der Identifizierung der eingeschleusten Erbinformation selbst. Dazu müsste aber nicht nur die Bausteinfolge des Genkonstrukts bekannt sein. Den Sportlern müsste auch vor den Wettkämpfen eine Probe Muskelgewebe entnommen werden. Einem solchen Eingriff dürften Athleten zu diesem Zeitpunkt kaum zustimmen, sodass ein derartiger Dopingtest wohl niemals routinemäßig eingesetzt werden kann.



Horrorvision des Gendopings

Wie werden sie sich nun präsentieren, die Athleten des genetischen Zeitalters? Wir schreiben jetzt das Jahr 2012, und die Olympischen Spiele laufen gerade. Der Sprinter Gene Doping unterbietet im Viertelfinale den acht Jahre alten Weltrekord um 15 hundertstel Sekunden. Als er im Halbfinale den Weltrekord mit unglaublichen 8,94 Sekunden noch einmal bricht, sind die Zuschauer sprachlos. Was hat ihm zu dieser Höchstleistung verholfen? Die Gentherapie, die sich bis dahin – vermutlich – etabliert und zu einer breit eingesetzten medizinischen Technik gemausert hat.

So wurde Gene Doping einige Zeit vor den Olympischen Spielen in Versuchung geführt. Sein Arzt versprach ihm die schnellste Myosin-Isoform in seinen Muskeln. Diese Variante trete normalerweise nicht in den großen menschlichen Skelettmuskeln auf, doch sei das Gen dafür vorhanden. Es müsse im Prinzip nur durch geschickte Tricks aktiviert werden. Die manipulierten Muskelfasern würden dann in ihren Eigenschaften den extrem schnellen IIb-Fasern entsprechen, die Ratten und anderen Kleinsäugern zu blitzartiger Flucht verhelfen. Der Trick sei, ein Gen für einen so genannten Transkriptionsfaktor einzuschleusen, der das schlummernde Gen für die Myosin-IIb-Isoform aktivieren könne. Schon nach drei Monaten sei so der Weltrekord im 100-m-Lauf mit Leichtigkeit zu brechen. Gene Doping stimmte der Manipulation zu, zumal sie ohne Gewebeprobe nicht nachzuweisen ist.

Statt zum Triumph gerät das olympische Finale jedoch für den Athleten zum Fiasko: Seine Patellarsehne hat den gewaltigen Oberschenkelmuskeln nichts mehr entgegenzusetzen, reißt sogar noch ein Stück Schienbeinknochen mit heraus, lässt ihn beim nächsten Schritt zersplittern. Das Ende einer Sprinterkarriere.

Diese Horrorvision des Gendopings macht eines klar: Selbst wenn vielleicht nicht jedes Mal katastrophale Nebenwirkungen in Kauf zu nehmen sind – mit dem Einzug neuer gentechnischer Verfahren in die Medizin wird sich die gesamte Sportwelt gewaltig verändern. Als verantwortungsbewusste Gesellschaft müssen wir uns daher fragen, ob sportliche Höchstleistungen sich nicht darauf beschränken sollten, zu zeigen, was natürlicherweise in uns steckt.

Jesper L. Andersen, **Peter Schjerling** und **Bengt Saltin** *arbeiten gemeinsam am Kopenhagener Muskelforschungszentrum, das der Universität Kopenhagen und der Universitätsklinik angegliedert ist. Andersen, ehemaliger Betreuer des dänischen Sprinterteams, forscht in der Abteilung für molekulare Muskelbiologie. Schjerling arbeitet dort als Genetiker. Saltin, Direktor des Zentrums, promovierte 1964 am Karolinska-Institut in Stockholm. Er ist auch Professor am August-Krogh-Institut der Universität Kopenhagen. Selbst einst Wettläufer, betreute er das dänische Nationalteam für Orientierungsläufe.*

Petra
Metropole am Rande der Wüste

Wer waren die Nabatäer, die jahrhundertelang von Petra aus den Weihrauchhandel kontrollierten? Antike Schriften und neu interpretierte archäologische Befunde zeichnen ein schillerndes Bild dieses arabischen Stammes.

Von Robert Wenning

Unruhig traben die Pferde voran. Die kaum drei Meter breite, dafür aber rund siebzig Meter hohe Schlucht im Fels eignet sich nicht gerade, um Vertrauen zu schaffen. Ihre Reiter sind nicht minder gespannt, was sie am Ende der Schlucht erwartet. Plötzlich – strahlendes Sonnenlicht! Hinter dem Schatten des Ausgangs ragt eine monumentale Fassade empor, von längst vergangenen Meistern in den Fels geschlagen. Dahinter, so vermuten die Abenteurer, befindet sich die Schatzkammer mit dem Heiligen Gral.

So weit „Indiana Jones und der letzte Kreuzzug“, ein Film von Steven Spielberg, der 1989 in die Kinos kam und eine archäologische Stätte im Süden Jordaniens weltbekannt machte: Petra, die Residenz der Nabatäer. Bis zu 1500 Touristen täglich erkunden heute die Schluchten, Höhen und Täler am Rande der wüstenhaften Araba, der Grenzzone zwischen Jordanien und Israel. Dort, wo das fruchtbare edomitische Hochplateau abbricht, hoffen vielleicht auch sie einen der Schätze zu finden, die arabischen Legenden zufolge in den Felsgräbern und -häusern auf ihre Entdecker warten. (Das Volk der Edomiter herrschte im 8.–5. Jh. v. Chr. über ein Territorium, das im Osten durch die Wüste und im Westen durch die Araba begrenzt wurde. Das Alte Testament bezeichnet sie als Nachbarn und Gegner Israels.)

Diesem Aberglauben war es zu verdanken, dass Petra zu betreten Anfang des 19. Jahrhunderts noch für Europäer verboten war. Welches Interesse hätten sie an den antiken Stätten auch haben können, als Schätze durch Zauberei zu bergen? Dem Schweizer Johann Ludwig Burckhardt (1784–1817) gelang es als Erstem, das Verbot zu durchbrechen. Im Auftrag des britischen Empires bereiste er als „Scheich Ibrahim“ verkleidet Arabien, sammelte Informationen über Handelswege ins Innere Afrikas und betrat 1812 Petra.

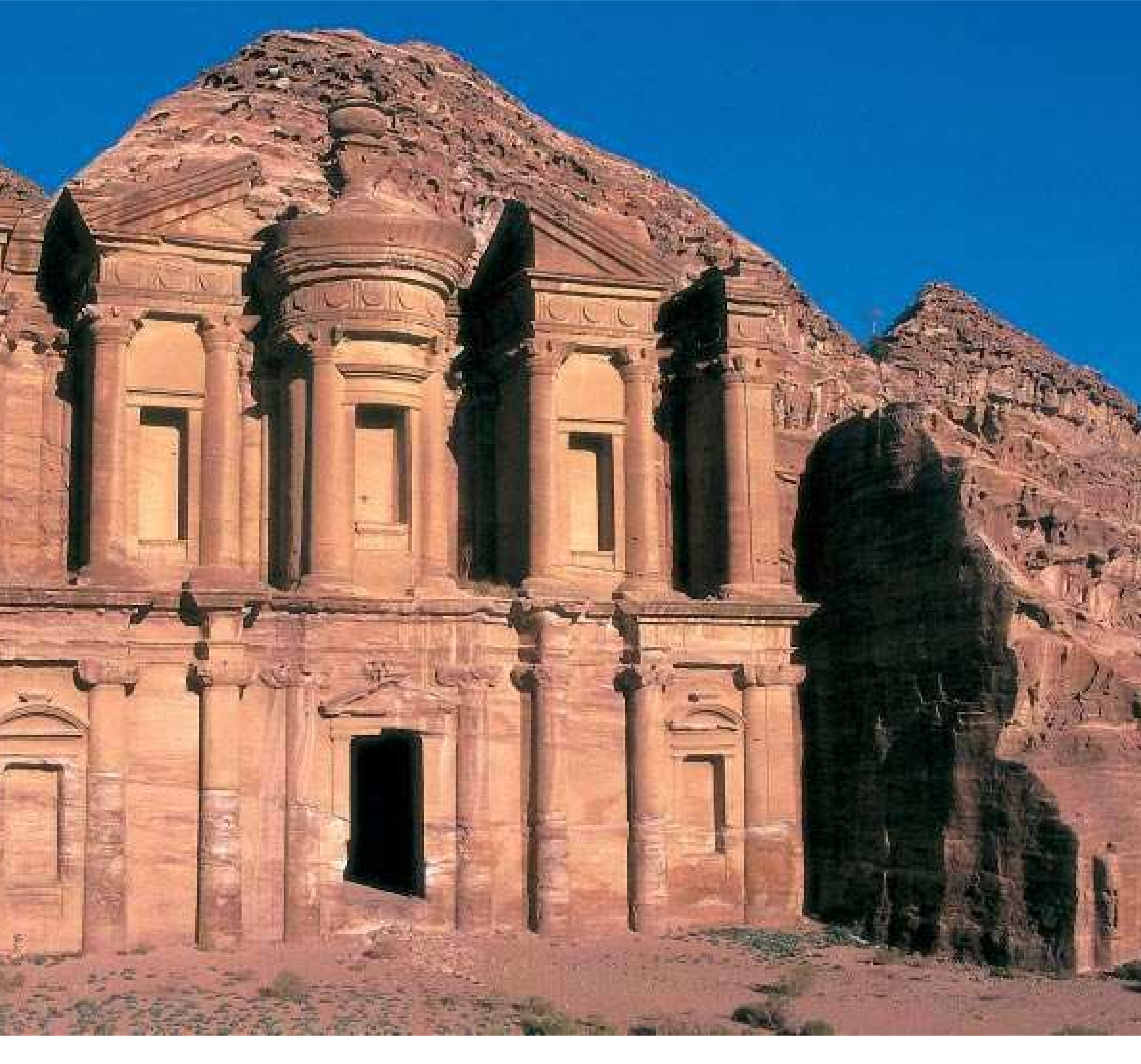
Sozusagen als realer Vorläufer Indiana Jones beschrieb er seine Eindrücke folgendermaßen: „… ein ausgehöhltes Grabmal, dessen Lage und Schönheit notwendig einen außerordentlichen Eindruck auf den Reisenden hervorbringen müssen, der fast schon eine halbe Stunde lang auf einem so dunklen, fast unterirdischen Weg gegangen war … Die Eingeborenen nennen dieses Denkmal Kasr Fara‘un oder Kastell des Pharao und behaupten, dass es die Residenz eines Fürsten gewesen. Allein es war wohl eher ein fürstliches Grabmal; groß aber muss der



MARCO CATTANEO

Reichtum einer Stadt gewesen sein, welche dem Andenken ihrer Herrscher solche Denkmäler widmen konnte.“

Der britische Spion mit Schweizer Pass hatte Recht: Die grandiose Fassade am Ende des 1,2 Kilometer langen und engen *Siq*, einer Felsspalte, schmückte einst ein Tempelgrab, von Steinmetzen und Bildhauern aus Alexandria mit drei Kammern aus dem Sandsteinfels gemeißelt. Kunstgeschichtler datieren die Chaznet Fara‘un (in der modernen Umschreibung) auf die Zeit 40–20 vor Christus. Vielleicht betteten die Bewohner ihren 30 vor Christus verstorbenen König Malichos I. dort zur Ruhe? Falls

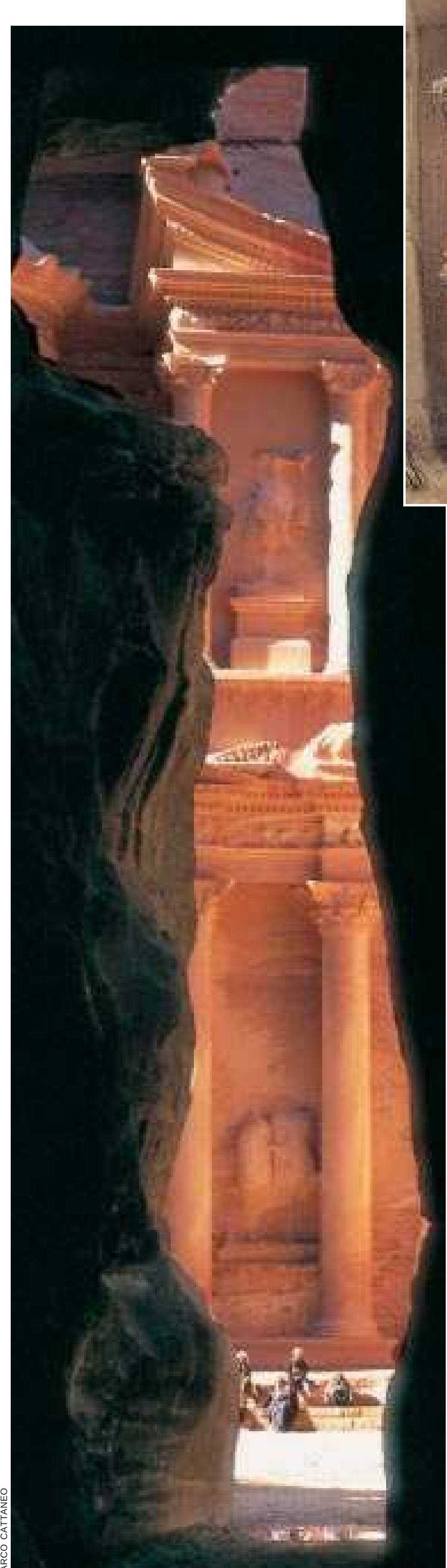


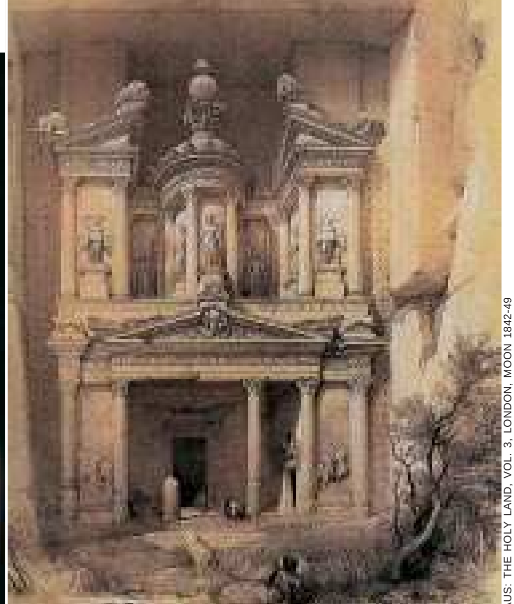
Ed Deir, zu Deutsch „Das Kloster“, liegt auf einem Bergplateau. Das Gebäude diente den Nabatäern zu kultischen Zwecken. Spätere kirchliche Nutzung erklärt den jetzigen Namen.

ja, stand in der zentralen hinteren Kammer einst der königliche Sarkophag. Doch wertvolle Grabbeigaben lockten vermutlich schon damals Diebe an. Heute stehen sämtliche Felsgräber leer.

Mit der Chaznet Fara'un haben die den Talkessel begrenzenden Felsfassaden ihren glänzenden Auftritt. Zu Anfang schlugen Beduinen dort nur ihre Zelte auf. Zwar gibt es im Talkessel keine Wasserquellen, doch der Zugang über den *Siq* ließ sich leicht verteidigen. Drohte ernsthaft Gefahr, zogen sie sich auf einen der Felsen zurück. Griechen nannten ihn Petra, das heißt Fels. Dieser Name stand bald synonym für den gesamten Talkessel, der im Laufe der Jahrhunderte zu einer Handelsmetropole ausgebaut worden ist; der einheimische Name, *Raqmu*, die Schimmernde, begegnet dem Archäologen nur vereinzelt in Inschriften. Den ursprünglichen Fliehfelsen identifizieren sie heute mit dem als Umm al-Biyara bekannten steilen, hohen Berg im Südwesten des Talkessels.

Auf einigen Quadratkilometern graben Archäologen seit 1929 Felsgräber, Heiligtümer und die Ruinen der Metropole des nabatäischen Königreiches wie auch die Spuren späterer Bewohner aus. Zisternen und künstliche Wasserläufe versorgten die Bevölkerung in den Sommermonaten. Vor den reißenden Fluten des Wadi Musa im Winter schützten sie den *Siq* durch einen Damm vor dem Eingang. Nur eines entdeckten die Forscher bislang nicht: schriftliche Aufzeichnungen. So sind sie bei der Rekonstruktion der Vergangenheit auf Inschriften und Artefakte, die archäologischen Befunde zur Bau- und Siedlungsgeschichte sowie die Zeugnisse zeitgenössischer Griechen angewiesen. Bis vor wenigen Jahren hat- ▶


MARCO CATTANEO


AUS: THE HOLY LAND, VOL. 3, LONDON, MOON 1842-49

Kurz vor dem Ende des Zugangs zum Talkessel von Petra, durch die *Siq* genannte enge Felsspalte, erscheint die Fassade des „Schatzhauses des Pharaos" (oben eine Zeichnung von David Roberts aus dem Jahr 1849). Tatsächlich handelt es sich um eine reich verzierte Grabfassade im alexandrinischen Stil.

ten diese Beschreibungen wie auch der Baustil in Petra die Überzeugung genährt, das Volk der Nabatäer sei dem Charakter nach „hellenistisch" geworden, doch mittlerweile erscheinen die Nabatäer in einem anderen Licht.

Dass sie reich seien, hatte schon Alexander der Große vernommen, als er 332 v. Chr. die Hafenstadt Gaza belagerte, eine Verladestation für die über die berühmte Weihrauchstraße aus Indien und Südarabien herbeigebrachten Gewürze und Spezereien. An Petra kam keine Karawane vorbei, und seine Bewohner kontrollierten den Handel mit Weihrauch – ein einträgliches Geschäft. Dieses Harz verschiedener Straucharten entwickelt beim Erhitzen einen aromatischen Geruch, der vor allem für kultische Zwecke und in Parfüms verwendet worden ist. Die Pflanzen gediehen aber nur in bestimmten Teilen Südarabiens und der benachbarten Küste Ostafrikas. Nicht anders als heutzutage die Mitgliedsstaaten der Opec hielten die Produzenten durch kontrollierten Anbau den Preis hoch. Das getrocknete Harz war dementsprechend in der gesamten orientalischen und griechisch-römischen Welt eine heiß begehrte und teuer bezahlte Ware. Kamele, die Schiffe der Wüste, bewältigten die 3700 Kilometer lange Route zum Mittelmeer in gut 85 Tagen. Jedes konnte maximal 400 Pfund Weihrauchkörner tragen, der Gesamtwert entspräche bis zu 200 000 Mark. Das machte alle Abgaben und Zwischenzölle bei weitem wett. Wer diesen Handel kontrollieren konnte, wurde reich. So entwickelte sich Petra dank seiner Lage an den Karawanenrouten zu einer Handelsmetropole. Kein Wunder, dass die Großmächte der Antike mehrfach versuchten, ebenfalls Kontrolle über den Weihrauchhandel zu gewinnen. Gelungen ist es keinem.

Ein Nachfolger Alexanders, der Makedone Antigonos Monophtalmos hat es 311 v. Chr. versucht. Zwar machte seine Truppe reiche Beute, doch sie wurde verfolgt und verlor den Kampf. Hieronymos von Kardia, ein griechischer Historiker, war an dem Raubzug als Feldherr beteiligt. Seine Beschreibung der Nabatäer ist in der „Weltgeschichte" des Diodoros von Sizilien aus dem 1. Jh. v. Chr. überliefert. Gut 10 000 Menschen sei der Stamm groß und lebe zwischen Syrien und Ägypten in einem Gebiet ohne Wasser. Daraus ergäbe sich zwangsläufig, dass sie vor allem von Raubzügen und Überfällen lebten, allerdings auch Kamele und Schafe züchteten. Sie seien kriegerisch und freiheitsliebend und noch nie jemanden unterworfen gewesen. Die Nabatäer lebten unter freiem Himmel, bauten keine Häuser, säten nicht und tränken keinen Wein. Aus heutiger Sicht beschrieb der Grieche die üblichen Charakteristika von Nomaden. Fast nebenbei erwähnt er, dass nicht wenige Nabatäer Weihrauch und Spezereien aus Arabia Felix ans Mittelmeer brächten.

Handelsbörse am Wüstenrand

Wer waren die Nabatäer und woher kamen sie? Darüber gehen die Meinungen weit auseinander. Mangels schriftlicher Quellen des Volkes selbst sind auch nur Vermutungen möglich. Aramäische Elemente in Sprache und Kultur machen eine Herkunft vom Persischen Golf wahrscheinlich. Viele Archäologen gehen davon aus, dass dieser Stamm spätestens im 4. Jh. v. Chr. in Nordwestarabien einwanderte.

Gewiss ist nur, dass vor den Nabatäern der arabische Großstamm der Qedar den Weihrauchhandel kontrollierte. Das Alte Testament kennt ihn und seinen Scheich Geschem als Gegner des Nehemia, eines persischen Beamten jüdischer Herkunft, der zum Wiederaufbau der 586 zerstörten Stadtmauern 445 v. Chr. nach Jerusalem geschickt wurde und die dortige Provinz Juda restaurierte. Die Nachbarn Jerusalems standen dieser Wieder-

belebung eher ablehnend gegenüber. Als Klientel der damals mächtigen Perser – also unter ihrer Herrschaft stehend, aber doch mit weitgehender Autonomie – besaßen die Qedar manche Vorrechte, prägten in Gaza sogar Geld.

Als sie sich aber im frühen 4. Jh. v. Chr. einem antipersischen Aufstand anschlossen, verloren sie nach dessen Niederschlagung ihre Vorrangstellung und wurden durch die Nabatäer ersetzt. Diese nutzten nun die Einkünfte aus dem Weihrauchhandel, um ihre politischen, militärischen und wirtschaftlichen Ambitionen zu stärken, die Karawanenwege zu sichern und mit festen Stationen auszubauen, darunter auch Petra im edomitischen Gebirge. Sie selbst wurden zu einem Großstamm unter einem Emir, der den Titel König übernahm.

Da nur den Nabatäern die geheimen Wasserstellen in der Wüste bekannt seien, berichtet Hieronymos, zögen sie sich vor Feinden dorthin zurück, welche dann Gefahr liefen zu verdursten. Diese Taktik bekam auch das römische Reich zu spüren, das 63 v. Chr. Juden und Nabatäer unterworfen hatte, und sich nun anschickte, den lukrativen Weihrauchhandel in eigene Hände zu nehmen. Petra war dabei unter römische Klientel geraten, musste also Kriegsdienste leisten. Als der römische Feldherr Aelius Gallus 25 v. Chr. mit einem großen Heer aufbrach, um das Handelsmonopol von Saba, dieser führenden südarabischen Macht, zu brechen, zog der nabatäische „Kanzler“ Syllaios als Scout mit. Das Ziel der Expedition lag durchaus in seinem Interesse, denn Saba sperrte die Weihrauchstraße nach Norden bei Nadschran seit etwa einem Jahrhundert.

Den Einfluss Roms wollte er freilich nicht stärken. Syllaios ließ die 10 000 schwer bewaffneten Legionäre unnötig durch Wüsten ziehen, viele starben oder erreichten geschwächt ihr Ziel. Das Heer vermochte gerade noch, die Sperrforts der Sabäer zu zerstören. Doch ihr Scout führte sie über falsche Wege zurück, bis nur noch wenige Soldaten überlebten. Für Rom war dieses Unternehmen ein Desaster. Ein neuer Feldzug ließ sich politisch nicht durchsetzen, und das Imperium gab seine Ambitionen im Weihrauchhandel auf. Petra hingegen erblühte, denn ohne die lästige Konkurrenz im Süden flossen die Einnahmen nun wieder reicher in die Kassen. Syllaios büßte seinen Verrat erst viele Jahre später, nachdem er sich auch noch mit Herodes und dem syrischen Legaten angelegt hatte; er wurde in Rom hingerichtet.

Tricks und langer Friede

Petra profitierte aber nicht nur vom Geschick seiner Herrscher, sondern auch von der gerade angebrochenen Zeit des Augustäischen Friedens. Zwei Jahre vor dem Feldzug gegen Saba war Augustus (27 v. Chr. – 14 n. Chr.) zum ersten römischen Kaiser ernannt worden. Es gelang ihm, das Reich zu einen und bis zu seinem Tode größere kriegerische Auseinandersetzungen zu unterbinden. Wohlstand herrschte allenthalben, und auch Petra, mittlerweile Hauptstadt eines Königreichs, partizipierte daran, wie der griechische Geograph Strabon berichtete. Die Nomaden hatten sich seiner Meinung nach zu reichen Hausbesitzern entwickelt, Krieger zu Kaufleuten. Manche Fehleinschätzung der Nabatäer beruht auf seinen Ansichten, die seine Landsleute geteilt haben dürften. Hellenistisch wirkend hat die Felsenstadt Römer und Griechen angezogen, sei es als Händler, Gelehrte oder Touristen. Die arabische Gastfreundschaft dürfte ihnen einen angenehmen Aufenthalt beschert haben. Doch wie Strabon betrachteten sie die arabische Metropole aus dem Blickwinkel ihrer eigenen Kulturmaßstäbe. Und irrten in vielem.

Wirklich Stadt war Petra im Sinne eines Verwaltungs- und Kultzentrums, aus arabischer Sicht aber war es Stammessitz, Residenzort des nabatäischen ▶

Das Nabatäische Reich



Die Weihrauchstraße und andere Handelswege des Vorderen Orients kreuzten sich in Petra – und brachten der Stadt Reichtum.

ATELIER KÜHN

Königs/Emirs und vor allem der Wohnsitz des Stammesgottes Dushara. Zwar gab es ein dynastisches Königtum, doch war der Regent nicht absolut, sondern der Stammesversammlung Rechenschaft schuldig. Zudem musste er dem ihn tragenden Stammesadel durch Positionen in der Verwaltung, Schenkungen und Gastmähler gebührend Reverenz erweisen. Zwar waren die Nabatäer Hausbesitzer und Kaufleute geworden, doch bewahrten sie Gebräuche und Gesetze der Nomaden. Archäologen nehmen an, dass ein Großteil des Stammes umherzog, sei es als Hirten, sei es als Karawanenbegleiter, während andere sesshaft Ackerbau oder Handel betrieben. Auch oblag die Rechtsprechung einer Volksversammlung oder einem Ältestenrat, nicht dem Herrscher. Gewinn und Beute kam letztlich – in sozialer Schichtung – allen Stammesmitgliedern zugute. Anders ließen sich die 580 mit monumentalen Fassaden geschmückten Familiengräber im Fels kaum verstehen.

Götter im Fels

Petra mag eine Art Weihrauchbörse gewesen sein. Hier wurden die Preise für den Weltmarkt festgesetzt und die großen Handelsgeschäfte getätigt. Darüber hinaus wurde auch mit allerlei anderen Waren gehandelt, vom Agrarprodukt bis zur Spezerei aus dem Osten. Wer durch gute Geschäfte beispielsweise den Stammesbesitz an Grund und Boden oder seinen persönlichen Bestand an Kamelen und Pferden mehren konnte, genoss hohes Ansehen. Doch gingen dem Volk bei schlechtem Handel Weideland, Plantagen oder Ackerflächen verloren, zog das eine öffentliche Verurteilung nach sich. Denn Viehhaltung und Ackerbau waren einfach lebensnotwendig, in einem Reich, das fast gänzlich aus Wüste bestand. Viehherden und Ländereien galten deshalb als Statussymbole.

Wer also zum Stamm gehörte, hatte gut leben, solange es diesem gut ging. Vermutlich gab es aber viele weniger Privilegierte im Umfeld Petras. Zwar scheint die Sklaverei keine so wesentliche Rolle gespielt zu haben wie etwa bei späteren arabischen Herrschaften oder zur Zeit Strabons auf den Latifundien der römischen Großgrundbesitzer. Große soziale Unterschiede gab es sicher gegenüber abhängig Hörigen, vor allem Bauern, die in den Gebieten heimisch waren, durch die die Nabatäer ihre Handelsrouten führten. Es gibt aber keinerlei Hinweise auf Konflikte zwischen den Schichten. Zudem bezeugen Inschriften, dass reiche Stammesangehörige Stiftungen machten, um die Situation der Landbevölkerung durch Bewässerungssysteme zu verbessern; vermutlich eine Art von Steuer.

Wenn schon nicht durch Sklaven, so wollten die Nabatäer doch auf andere Weise nach außen hin zeigen, dass sie es zu etwas gebracht hatten – Reichtum beruhte schließlich nach ihrer Ansicht auf



In der Flanke des Dschebel al-Hubtha, dessen breites Massiv den Talkessel nach Nordosten abschließt, liegt die „Königswand“: Große Fassadengräber, in denen vermutlich nabatäische Scheichs zur letzten Ruhe gebettet worden sind.

FOTOS: MARCO CATTANEO

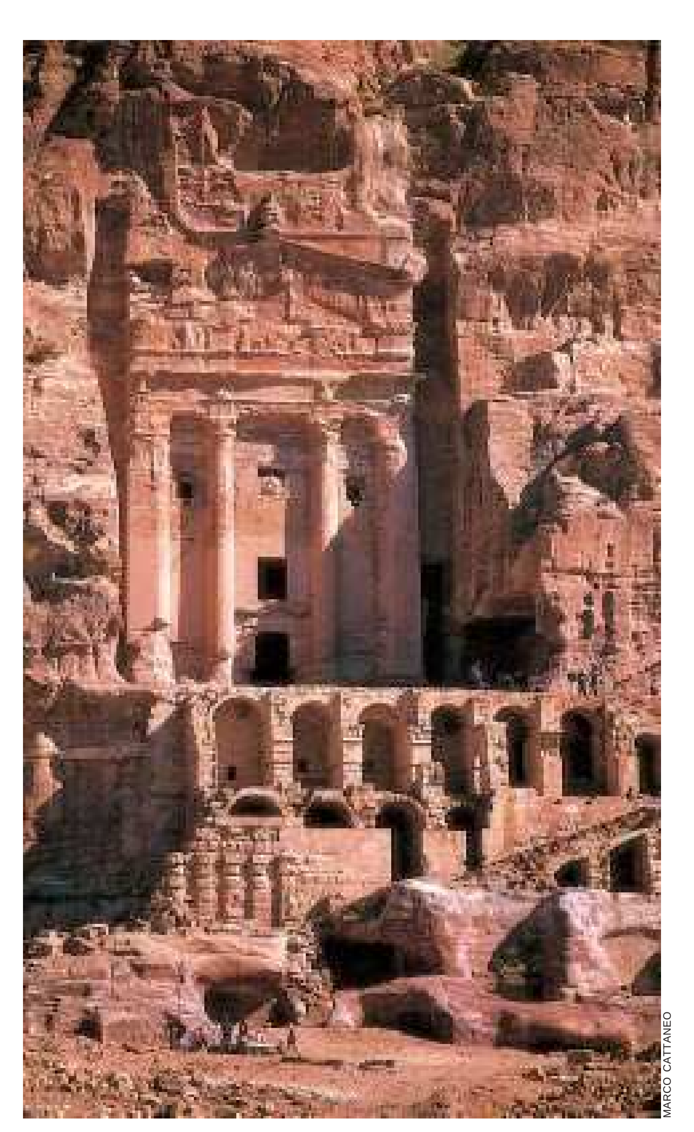
dem Segen der Götter. So begannen sie gegen Ende des 1. Jahrhunderts v. Chr. erstmals Tempel zu errichten und figürliche Darstellungen ihrer Gottheiten zu formen, während sie zuvor – und auch weiterhin – behauene Steinblöcke von wenigen Zentimetern bis zu 1,20 Metern Höhe (so genannte Betyle) anbeteten. Das Phänomen einer offensiven Selbstdarstellung durch prunkvolle Heiligtümer war in jener Zeit auch bei anderen nahöstlichen Mächten verbreitet, man denke an die Tempelbezirke von Palmyra und Jerusalem.

Römisch-griechische Mischkunst

Für sich selbst errichteten sie erstmals Steinhäuser, auch wenn viele das durchaus luxuriöse Wohnen in Zelten und in Felshöhlen vorzogen. In ihrer Ausstattung konnten sie es mit den Villen Roms und Pompejis aufnehmen: Farbige und sogar vergoldete Stuckaturen und Fresken illusionistischen Stils schmückten die Innenwände und beeindrucken noch heute den Besucher. Einige einheimische Künstler haben sich in Inschriften verewigt – ein Beleg gegen Strabons These, alle Kunstwerke müssten importiert worden sein. Der Grieche hielt die Nabatäer wohl für Barbaren. Seine Kollegen des 19. und 20. Jahrhunderts äußerten sich nicht viel positiver: Lange galt die nabatäische Kunst als Plagiat der griechischen und römischen. Allmählich begreifen Archäologen und Kunsthistoriker, dass es geradezu ein Charakteristikum der Künstler des antiken Petras war, aus den Vorgaben der hellenistisch-römischen Umwelt eine eigenständige Mischform zu kreieren, die wir heute als den nabatäischen Stil bezeichnen.

Nicht nur die Hauptstadt Petra erlebte einen Bauboom: Entlang der Handelsrouten im Einflussbereich der Nabatäer entstanden Dörfer, wo zuvor Wüste war, und kleinere Niederlassungen wurden zu Verwaltungszentren ausgebaut. Es scheint so, dass in dieser Phase die Besiedlung auch weiter nach Norden vorgeschoben wurde. Das nabatäische Reich erstreckte sich schließlich von Nordwestarabien, etwas nördlich von Medina, über die Regionen Midian, Sinai, Negeb, Edom, Moab und unter Ausgrenzung der Dekapolis – eigenständigen Städten in Jordanien zwischen dem Golan und dem heutigen Amman – bis in den Hauran in Südsyrien. In die heutige politische Landkarte übersetzt tangierte das Reich die Staatsgebiete von Saudi-Arabien, Ägypten, Israel, Jordanien und Syrien. Die Nabatäer waren somit in ihrer Hochzeit das Zentrum der arabischen Welt. Ihre Schrift, eine Zwischenstufe zwischen dem perserzeitlichen Reichsaramäisch und dem Hocharabisch, wurde zur Amtssprache vieler Völker im Nahen Osten. (Das bedeutet für den Archäologen leider auch, dass entsprechende Inschriften nicht eindeutig rückschließen lassen, ob man es mit Nabatäern zu tun hat.)

Knapp hundert Jahre später mussten sich die Bewohner der Felsenstadt mit einer neuen politischen Situation zurechtfinden: Aus dem freien Königreich wurde die römische Provinz Arabia. Die Vorboten standen schon seit längerem am Horizont. Ein Aufstand der Juden zwischen 66 und 70 n. Chr. hatte zur Folge, dass das benachbarte Judäa, seit 6 n. Chr. autonome römische Provinz, seinen Rest Selbstständigkeit verlor; damit rückte das Imperium bedrohlich näher. Vielleicht war das der Grund für den letzten nabatäischen König, Rabb'el II. (70–106 n. Chr.), arabische Grundwerte in Religion und Kultur gegenüber denen der Griechen und Römer zu betonen, insbesondere Dushara, den Gott von Petra, als seinen persönlichen Schutzgott und zugleich als den Staatsgott aller Nabatäer herauszustellen. Alte, unter freiem Himmel liegende Heiligtümer der Nabatäer erfuhren nun die gleiche, wenn nicht mehr, Förderung wie die Tempel und erhielten überregionale Bedeutung.


MARCO CATTANEO

Dieses Grab in der Königswand ist nach der Urne benannt, die den Giebel krönt. Im Jahr 446 n. Chr. wurde es von Bischof Jason zu einer Kirche umgebaut. Davon zeugen neben der Umgestaltung des Grabinnern die Stützbogen unterhalb des Grabes: sie tragen den Vorhof.

Vom Königreich zur Provinz

Die Wiederbesinnung auf das Verehren von Göttern in Betylen spiegelte sich auch in Beinamen für die Götter. So sprachen sie nun von Dushara A'ra, das ist „Der im Stein Gesalbte“. Im Endeffekt konnte nun jeder Nabatäer in allen Teilen des Reiches neben dem regionalen Hauptgott auch Dushara in Heiligtümern „antreffen“ und verehren. Gleichzeitig wurde Dushara als Staats- und Nationalgott propagiert. Offensichtlich versuchte Rabb'el II die Nabatäer stärker an Petra zu binden, hatte vielleicht sogar das Ziel, aus dem Stammesfürstentum einen Staat zu machen.

Gab es auch Aufstände gegen Rom? Kündigte Petra vielleicht dem mächtigen Imperium die Klientelschaft? Warum auch immer: Im Jahre 106 marschierten überraschend zwei Legionen ins nabatäische Reich ein – das freie Königreich wurde zur Provinz Arabien. Zwar wurde die Eroberung erst fünf Jahre später offiziell bekannt gegeben, vermutlich um den Sieg des römischen Kaisers Trajan (98–117 n. Chr.) über das Volk der Daker nicht zu schmälern, dennoch machte sich die römische Militärverwaltung sofort an die Arbeit. Straßen mit Meilensteinen erschlossen das Land, darunter die *via nova Traiana* von Bostra in Syrien bis Aila am Golf von Aqaba. Dörfer erblühten zu Städten. Über das Schicksal des nabatäischen Königshauses schweigen die Geschichtsschreiber. Der Stamm ▶



Im Zentrum von Petra verlief diese römische Säulenstraße. Einstige Verkaufs- und Speicherräume sind heute nur noch Ruinen.

verlor aber ohne seine Führungsspitze und das einstige Handelsmonopol rapide an Bedeutung und verschmolz mit anderen arabischen Völkern.

Petra erwies sich als anpassungsfähig und wurde vermutlich Hauptstadt der neuen Provinz (eventuell war das aber auch Bostra in Syrien, wo die römische Provinzlegion stationiert wurde). Die Münzen der Stadt zeigten nun nicht mehr das nabatäische Königspaar, sondern eine weibliche Figur, die Tyche. Sie steht für eine autonome Stadt. Als solche besaß Petra einen Stadtrat und ein Ratshaus. Vieles spricht dafür, dieses Gebäude mit einer Entdeckung von 1997 im Zentrum von Petra zu identifizieren. Im so genannten Großen Tempel, einem monumentalen Komplex über zwei Terrassen hinweg, stießen die Ausgräber unerwartet auf ein theaterähnliches Zuschauerhalbrund, das gut 600 Personen fassen konnte. Das entspricht der damals üblichen Größe eines Rates. Das Spannende am archäologischen Befund ist, dass dieses Gebäude ursprünglich anders genutzt worden sein muss. Durch weitere Ausgrabung wollen die Archäologen klären, ob sich dort zuvor ein Tempel oder der Königspalast befunden hat. Die Umwandlung eines Heiligtums in ein Ratshaus wäre freilich äußerst ungewöhnlich.

Trajan versuchte, der Stadt einen römischen Anstrich zu geben. Die alte Prozessionsstraße entlang des Wadi Musa im Zentrum des Talkessels wurde zur Säulenstraße mit überdachtem Bürgersteig und dahinterliegenden Geschäften verbreitert. Eine monumentale Freitreppe führte auf die nächste Hangterrasse, wo man den Marktplatz annimmt. Ein römischer Bogen zierte den Eingang. Die Weihinschrift von 114 n. Chr. nannte den neuen Titel der Stadt: „Metropolis von Arabien“. Baugeschichtlich noch bedeutender war das so genannte Temenos-Tor, das unter Trajan oder Hadrian errichtet worden sein muss, vielleicht unter Verwendung von Baugliedern eines älteren Vorläufers. Es gewährte über drei verschließbare Durchgänge den Eintritt in den heiligen Bezirk des Qasr al-Bint, den Haupttempel Petras. Büstenreliefs von Gottheiten und Schutzgeistern zieren propagandistisch die Pilaster (flache, wenig vorspringende Wandpfeiler).

Viel mehr an römischen städtischen Elementen gibt es nicht in Petra; erst hundert Jahre später kommt noch ein Brunnenhaus dazu. Dabei war Petra eine zunächst durchaus wichtige Stadt in der römischen Verwaltung. Außerhalb des Zentrums blieb die einheimische Wohnstruktur erhalten. Der römische Provinzstatthalter von 127 n. Chr., T. Aninius Sextius Florentinus, ließ sich sogar in einem Felsengrab bestatten – möglicherweise hatte er es okkupiert, denn diese Stätten waren immer Gräber reicher nabatäischer Familien. Weihinschriften an römische Gottheiten und Statuen römischer Götter und Kaiser zeigen die Dominanz der neuen Herren. Petra blieb zwar eine bedeutende Handelsstadt, doch floss viel vom Gewinn in andere Städte oder an den römischen Fiskus ab.

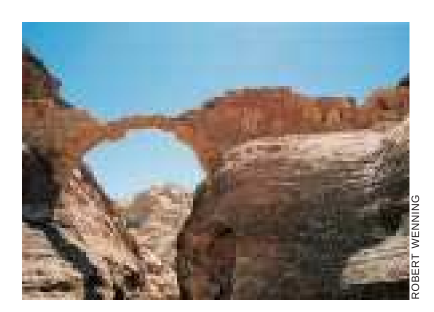
Als sich die römischen Kaiser aus dem Geschlecht der Severer im frühen 3. Jh. verschiedenen Städten der östlichen Provinzen annahmen, erfuhr Petra kaum Förderung, vom steuerlich günstigen Status einer *colonia* und dem Bau eines Brunnenhauses abgesehen. Es hatte of-

Die antike Wasserversorgung

Regen auf Umwegen

Wie war es möglich, dass im Talkessel von Petra eine Metropole entstand, obwohl es keine Quellen zum Wasserschöpfen und für den Gartenbau gab? Die Nabatäer erwiesen sich als Meister im Wasserbau. Über mehrere Leitungen gelangte das kostbare Nass von kilometerweit entfernten Quellen des Hochlands bis in das Zentrum. Eine Leitung von der Mosesquelle her, am Eingang der heutigen Stadt Wadi Musa, wird über Kanäle und einen Bogenaquädukt um das Bergmassiv des Dschebel al-Hubtha in die Stadt geleitet, wo sie beim so genannten Etagengrab in eine riesige Zisterne von 300 Kubikmetern mündete. Forscher schätzen, dass allein diese Leitung die mit ihr verbundenen Zisternen mit 1,5 Millionen Liter Wasser versorgte.

Zwei Wasserleitungen, die von großen Teichen am Ortsende von Wadi Musa ausgehen und wahrscheinlich ebenfalls mit der Mosesquelle verbunden waren, verlaufen entlang der Felswände des *Siq*. Davon bestand die eine aus Tonröhren in einem Mörtelbett; ein Übergangsbecken erzeugte den erforderlichen Wasserdruck. Eine weitere Leitung von der Quelle Braq im Südosten der Stadt wurde ebenfalls über eine weite Entfernung in die Stadt gebracht, wo sie im Wadi Farasa nahe dem Hohen Opferplatz bei einem monumentalen Löwenrelief ein Bassin speiste und mit einem anderen Zweig zum Qasr al-Bint führte. Zusätzlich wurde der Winterregen in zahlreichen Zisternen gespeichert. Dazu nutzte man die kanalartigen Ablaufkanten an fast allen Felshöhen als Ableitungssysteme. Umgekehrt mussten die Bewohner



Dieses Aquädukt war Teil der Dschebel al-Hubtha-Wasserleitung.

das im Winter reißende Wadi Musa zähmen und seine Fluten vor dem *Siq* ableiten. Dazu diente ein an einer Verengung aufgemauerter Staudamm.

Wasser wurde nicht nur zur Versorgung der Bewohner und ihrer Tiere oder zur Bewässerung der Gärten benötigt – man muss sich Petra in dieser Zeit wohl als eine künstliche Oasenstadt vorstellen –, sondern auch im Kult. Überall, wo Wasser aus den Felsrissen hervortrat, dankten die Nabatäer einer Gottheit für das Leben spendende Nass.



ROBERT WENNING

Hier tagte der neue Rat der römischen Stadt Petra. Vielleicht hielt an diesem Ort auch der römische Statthalter der Provinz Arabien Gericht.

fensichtlich seine Bedeutung weitgehend verloren. Erschwerend kam eine allgemeine Wirtschaftskrise im Römischen Reich hinzu. Als ein Erdbeben im Jahre 363 die Stadt heimsuchte, reichten die Mittel nicht einmal aus, um alle Schäden zu reparieren.

Im Zuge der Reformen unter Kaiser Diokletian Ende des 3. Jahrhunderts verlor Petra seinen Rang als Provinzhauptstadt an Bostra. Das änderte sich auch nicht, als das römische Reich zerfiel und Arabien dem byzantinischen Teil mit der 330 eingeweihten neuen Reichshauptstadt Konstantinopel zufiel. Erst um 358 erlangte es ein wenig Glanz zurück, als bei einer neuerlichen Reform der Süden der Provinz Arabien mit Teilen des Negeb zur Provinz Palaestina Salutaris (ab 400 Palaestina Tertia) zusammengefasst wurde; erneut hatte Petra den Status einer Hauptstadt inne.

Das von Konstantin I. (280–337) im oströmischen Reich zur Staatsreligion erhobene Christentum erschien auch bald in Petra. Die Funktion als Hauptstadt, seine Lage im „Heiligen Land" und vor allem das Aarongrab auf dem Dschebel Harun begründeten den Anspruch. Bischöfe suchten den Bewohnern von Petra die christlichen Lehren nahe zu bringen. Die Kirchenväter berichteten aber von deren Hartnäckigkeit, an dem alten Glauben festzuhalten.

Erst um die Mitte des 5. Jahrhunderts konnte sich das Christentum auch in Petra durchsetzen. Im Jahre 446 ließ Bischof Jason das so genannte Urnengrab, wahrscheinlich das Grab eines nabatäischen Königs, in eine Kathedrale umbauen. Zwei andere Kirchen jener Zeit wurden erst vor wenigen Jahren bei Ausgrabungen entdeckt, die Basilika und die „Kirche auf dem Kamm", beide am Nordufer des Wadi Musa im Zentrum gelegen. Die Basilika verfügte über prachtvolle Mosaiken.

Ritter in Petra

Eine echte Sensation war es aber, als dort 1993 verkohlte Reste eines Privatarchivs geborgen wurden. Finnische und amerikanische Wissenschaftler haben Reste von 152 Papyrusrollen retten und konservieren können. Das Puzzle ihrer Rekonstruktion dauert noch an, einige Details sind aber schon bekannt. Die Schriften behandeln die wirtschaftliche Situation von Stadt und Umland im 6. Jahrhundert. Demnach war – entgegen alter Vorstellungen – mit dem Sieg des Christentums ein wirtschaftlicher Aufschwung einhergegangen, der noch das ganze 6. Jh. anhielt. Dennoch scheint die Staatskirche das weitab gelegene Petra bereits als Verbannungsort für Kriminelle und Kirchenfeinde genutzt zu haben. Gegen Ende jenes Jahrhunderts begannen sich die Zeiten vermutlich wieder zu ändern, denn das südliche Schiff der Basilika wurde für kurze Zeit als Vorratslager genutzt. Als dort Feuer ausbrach, fiel das Archiv in einem Seitenraum ihm zum Opfer.

Offensichtlich gelang es im 7. Jh. nicht mehr, Wasserleitungen und andere lebenswichtige Einrichtungen instand zu halten, die Bewohner fristeten ihr Leben in Ruinen. Petra verödete. Naturkatastrophen förderten dies vielleicht noch, wir wissen es nicht.

Erst die Kreuzfahrer hinterließen wieder ihre Spuren. Das Aarongrab war ein Grund, die strategische günstige Lage an der Grenze zu Ägypten ein anderer. Im 12. Jh. errichteten Ritter zwei Burgen, doch ohne den Ort als das alte Petra zu erkennen. Sie kannten nur die christliche Deutung als Tal des Moses und Berg des Aaron. Die Gräber hielt man für Häuser der Moses begleitenden Israeliten. Die Festungen gingen aber noch im gleichen Jahrhundert an die Muslime verloren. Nur die Verehrung für das Grab Aarons, der im Islam als Prophet Harun gilt, überdauerte. Unter dem Vorwand, es besuchen zu wollen, gelang es Johann Ludwig Burckhardt 1812 Petra zu betreten.

Schon vor den Kreuzfahrern hatten Beduinen die antiken Ruinen, insbesondere die Felshäuser und -gräber, in Besitz genommen. Sie hüteten deren sagenumwobene Schätze über viele Jahrhunderte hinweg und verwehrten Fremden den Zutritt. Erst vor wenigen Jahren bezogen ihre Nachkommen ein nahe gelegenes, neues Dorf. Als Manager von Hotels und Cafés, Kunsthandwerker und Andenkenverkäufer, als Besitzer von Pferden, auf denen Touristen zum *Siq* reiten, und Führer leben sie nun von dem Erbe einer der ersten arabischen Großmächte, auf die das moderne Jordanien mit Recht stolz ist. ■



*Der Archäologe **Robert Wenning** habilitierte sich 1995 an der Katholischen Universität Eichstätt mit einer Studie zu eisenzeitlichen Gräbern in Juda. Seine Forschungen konzentrieren sich auf die antiken Stätten des biblischen Palästinas und die kulturellen Verflechtungen dieses Raums. Unter diesem Ansatz stehen auch seine Studien über das Reich der Nabatäer.*

Literaturhinweise

Petra. Von Maria Giulia Amadasi Guzzo und Eugenia Equini Schneider, Hirmer Verlag, München 1998.

Petra. Antike Felsstadt zwischen arabischer Tradition und griechischer Norm. Von Thomas Weber und Robert Wenning (Hrsg.). Verlag Philipp von Zabern, Mainz 1997.

Spektrum-Report:

Digitale Filmtechnik

Die Filmindustrie ist im Umbruch. Ob Spielfilm oder Werbespot – ohne Digitaltechnik geht heute nichts mehr. Sie unterstützt den kreativen Prozess und bietet Einsparpotenzial. Ihrem Einfluss ist es zu verdanken, dass die Nachbearbeitung mehr und mehr Teil des kreativen Prozesses wird. Der neueste Trend: Digitaltechnik schon beim Dreh.

SPEZIALEFFEKTE

Wirklicher als die Wirklichkeit

Digitale Effekte zaubern in Film und Video eine Scheinwelt. Die besten Tricks sind dabei oft die, die vom Zuschauer unbemerkt bleiben.

Von Wolfgang Borgfeld

Seit es die Fotografie gibt, erliegen Menschen der Versuchung, das Abgebildete für ein Abbild der Wirklichkeit zu halten. Mehr noch gilt das für den Film, der in fantastische Welten einlädt oder – in der Werbung – dem Zuschauer verspricht, bei Gebrauch eines bestimmten Produkts zum Beispiel schön, gesund und glücklich zu werden. Natürlich weiß jeder im Grunde, dass Bilder retuschiert, ergänzt und beschnitten werden, um solche Wirkung zu erzielen und ihre Botschaften zu übermitteln. Doch wie weit dieses Inszenieren von Wirklichkeit geht, ist nur wenigen bewusst.

Im Zeitalter der Digitalisierung wäre eine solche Medienkompetenz dringend erforderlich, denn die Möglichkeiten zur Manipulation der Aufnahmen sind heute schon fast unerschöpflich. Das demonstrierte kaum einer so anschaulich wie der Flüssigmetall-Cyborg T-1000, als er 1991 in „Terminator 2“ mal eben durch ein Gitter glitt oder aus dem Fliesenmuster des Fußbodens erwuchs. Industrial Light & Magic, das von „Krieg der Sterne“- Regisseur George Lucas gegründete Unternehmen für Computertricks, vervollkommnete dafür das Morphing-Verfahren, bei dem der Rechner fließende Übergänge zwischen zwei Objekten herstellt: Beide werden mit einem Gitternetz unterlegt und dessen Knotenpunkte zur Überblendung verschoben. So wurde im Beispiel aus einem Kachelfußboden der Roboter beziehungsweise sein Darsteller. Zu den Meilensteinen digitaler Filmkunst zählen auch „Jurassic Park“ (1993) – Menschen auf der Flucht vor einem Tyrannosaurus Rex – und „Hollow Man“ (2000): Kevin Bacon wurde unsichtbar und enthüllte dabei sukzessive seine anatomische Struktur. Werke wie diese machen deutlich, dass Filmemacher die Welt weniger denn je einfach nur abbilden und allenfalls noch neu zusammenstellen, sondern dass sie diese schlichtweg erfinden.

Dabei kommt der so genannten Postproduction immer größere Bedeutung zu. War sie noch vor einigen Jahren ein dem Drehen nachgelagerter Prozess, der vor allem den Filmschnitt, also die Auswahl und künstlerische Komposition der aufgenommenen Bildsequenzen, zum Inhalt hatte, umfasst sie heute immer öfter auch die Bildgestaltung und wird damit Teil der Produktion selbst. Ihre ganze Spannweite zu beschreiben fällt schwer, denn die Bearbeitungsmöglichkeiten eines Film- oder Videobildes sind heute unendlich vielfältig.

Ins Auge fallen spektakuläre Effekte wie in den eingangs erwähnten Filmen, doch meist wird die digitale Bildgestaltung in der Postproduction vom Zuschauer gar nicht wahrgenommen. Dazu gehört beispielsweise die Korrektur von Farben. Es ist vergleichsweise einfach, Kontraste, Helligkeiten und Intensitäten zu verstärken oder abzuschwächen. Ein gutes Beispiel dafür gibt Wim Wenders dokumentarischer „Buena Vista Social Club“ (1999), der in technicolorartigen Szenen in Havana und monochromen Konzertaufnahmen Musik und Lebensgefühl kubanischer Altstars des Son darstellte. Farbkorrekturen gehören auch

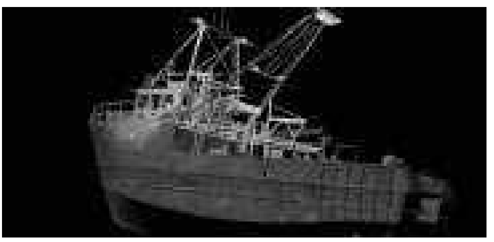


PIXAR ANIMATION

„Toy Story“, ein Highlight des Animationsfilmes, nutzte Techniken, wie sie auch in der so genannten Postproduction eingesetzt werden.



„Der Sturm“ von Wolfgang Petersen fand teilweise im Computer statt. Dabei wurden mehrere Aufnahmen kombiniert: ein Modell des Schiffes, eine Simulation des aufgewühlten Ozeans, ein von der Seite kommender Brecher, die Wucht einer auf den Bug auflaufenden Welle und die Beleuchtung durch einige Lampen.











zum Alltag bei Werbefilmen, etwa um das Rot einer Verpackung satter, das Weiß von Wäsche strahlender wirken zu lassen.

Farben zu verändern ermöglicht auch die Konversion einer bei Tag gedrehten Szene in eine Nachtaufnahme. Dazu bedarf es allerdings meist weiterer Eingriffe: Schatten müssen erzeugt oder gelöscht werden, Scheinwerfer oder andere Beleuchtungen und ihre Reflexionen kommen als typische Details nächtlicher Szenen hinzu. Noch anspruchsvoller, aber mitunter aus logistischen Gründen zwingend notwendig ist ein Wechsel der Jahreszeiten.

Von Krähen und Pinguinen

Als Joseph Vilsmaiers Musikerbiografie „Comedian Harmonists“ 1997 in die deutschen Kinos kam, bemerkte wohl kein Zuschauer, dass eine winterliche Friedhofsszene im Sommer gedreht worden war (siehe nächste Seite). Die Experten von „Das Werk“ färbten Laub von Grün auf Braun um oder retuschierten es gleich ganz, der Himmel erhielt einen fahlen Schimmer und der Boden einen Grauton. Die Bearbeitung des bewegten Filmmaterials wäre zu aufwendig geworden, weshalb man einen Kniff anwendete: Vom sommerlichen Hintergrund wurde ein Standbild gemacht und bearbeitet, der Darsteller Ulrich Noethen später wieder integriert. Bewegte Elemente brachten Leben hinein: Eine Krähe fliegt durchs Bild, einzelne Blätter bewegen sich leicht.

Sehr häufig dienen beim Drehen stahlblaue oder giftgrüne Farbflächen als Platzhalter für Bildteile, die erst in der Endbearbeitung eingesetzt werden; dieses Verfahren wird als Bluescreen bezeichnet (siehe nächste Seite). Ein Beispiel: In einem Werbespot für die Automarke Hyundai wanderten Pinguine durch München. Ihr Ziel: das Autohaus, in dem Wagen mit toller Klimaanlage zu haben seien. Ein Filmteam nahm dafür zunächst leere Straßen auf, wobei es jeweils die Kameradaten protokollierte, insbesondere Brennweite, Neigungswinkel und Abstand von der Straße. Dann wurden in einem blauen Studio exakt die gleichen Perspektiven reproduziert und dabei zwei Pinguine aufgezeichnet, die ein Dompteur in vom Drehbuch gewünschten Richtungen führte. Um beide Bildquellen zu kombinieren, wurde in den Studioaufnahmen die blaue Umgebung „maskiert“, das heißt transparent gemacht, sodass dort nur die Pinguine zu sehen waren. Die ließen sich dann in die leeren Straße beliebig oft einsetzen.

Das klingt leichter als es getan ist, denn binnen einer Sekunde Film mussten 24 Vollbilder (im Fernseh- beziehungsweise Videoformat 25 mal 50 Halbbilder) maskiert werden. Der Computer ermöglicht eine Automatisierung mittels eines so genannten „Chroma-Keyers“: Per Mausklick löscht dieser über die ganze Länge einer zuvor definierten Bildsequenz die Daten alles Blauen. In Anlehnung an die klassische Filmbearbeitung zeigt dies der Computer, indem er die entsprechenden Partien ▶

schwarz färbt. Bei dem Bluescreen-Verfahren ohne Rechnerunterstützung sind derartige Bereiche dann lichtundurchlässig und wirken als Maske.

Nach der Kombination der verschiedenen, maskierten „Filmstreifen“ läuft der Pinguin durch die Straße. Natürlich kann man diesen Prozess beliebig oft wiederholen und aus einem Pinguin eine ganze Herde machen. Allerdings reflektierte das weiße Brustgefieder der Vögel trotz sorgfältiger Ausleuchtung die blaue Studiofarbe – ein Fall für die Farbkorrektur. Zudem erzeugten die Federn fein verästelte „Berandungen“ der Vögel; die automatischen Maskierungs-Werkzeuge stießen hier an ihre Grenzen und Handarbeit, also Maskieren Pixel für Pixel, war gefragt.



Aus Sommer wird Winter – die Postproduction macht es möglich, hier für den Film „Comedian Harmonists“.

Nichts ist unmöglich

Die Protagonisten in „Jurassic Park“ wären sicher froh gewesen, hätten sie sich nur mit Pinguinen herumschlagen müssen. Szenen wie die nächtliche Verfolgung durch einen T-Rex markieren das andere Ende der Möglichkeiten digitaler Nachbearbeitung: das Einfügen virtueller, räumlicher Objekte mit fotorealistischer Anmutung in Realaufnahmen. Diese im Computer generierten Objekte sind Produkte der 3D-Animation und erlauben die Gestaltung vollkommen artifizieller Bildwelten, so genannter Computer Generated Images (CGI). Hier wird deutlich, dass die Unternehmen der digitalen Postproduktion die Sphären der klassischen Nachbearbeitung bereits verlassen haben. Längst entstehen Bildwelten erst mit Hilfe der Gestalter am Computer, mitunter sind diese Bildwelten dann auch komplett virtuell, reine Produkte der 3D-Animation.

Als riesige Brontosaurier im „Jurassic Park“ Blätter von den Bäumen zupften, war dem Zuschauer natürlich klar, dass er nur eine perfekte digital erzeugte Illusion genoss. Bei einer Autoverfolgungsszene von „Mission Impossible 2“ (2000) hingegen dürfte er nicht einmal das bemerkt haben. Tricktechniker fügten bei der Nachbearbeitung computergenerierte Staubwolken und wegspratzende Steine ein, um das Ganze dramatischer wirken zu lassen.

Von gewollt künstlich wirkenden Animationen abgesehen, bieten sich rein virtuelle Bildelemente überall dort an, wo herkömmliche Tricks gar nicht möglich sind oder schlechtere Ergebnisse liefern würden. Dabei darf nicht übersehen werden, dass der Zeitaufwand erheblich sein kann. Bei der Gestaltung einer fotorealistischen Sphinx für den Vorspann der gleichnamigen ZDF-Reihe erzeugten unsere Animateure zunächst ein Gitternetzmodell als Gerüst. Um eine detailreiche Oberfläche zu erhalten, umfasste das Netz 120 000 Vielecke (Polygone). Damit daraus eine Sphinx entsteht, mussten Textur, Farben und Lichtwirkung definiert werden. Je mehr Kanten und Strukturen das auf die Oberfläche einfallende – simulierte – Licht brechen oder ablenken können, desto höher wird die Datenmenge und desto komplexer die Berechnung eines Bildes (fachlich „Rendering“) beziehungsweise einer Bewegungssequenz. Um den fotorealistischen Eindruck zu erhöhen, wurde der Weg des Lichts und damit alle Brechungen durch Verfolgung einzelner Strahlen bis zum Zuschauer berechnet (fachlich „Raytracing“). Im Schnitt dauerte das hier pro Bild fünf bis zehn Minuten. Koppeln von drei Rechnern mit jeweils zwei Prozessoren beschleunigte das Verfahren, sodass die insgesamt sechssekündige Animation nach 105 Minuten gerendert war – die Hardware gewinnt an Bedeutung.

So vielfältig die Möglichkeiten der digitalen Postproduction sind, der Teufel steckt oft im Detail. Um verschiedene Bildwelten – etwa Realaufnahmen und virtuelle – glaubhaft miteinander zu verschmelzen, müssen sie von vornherein sehr präzise aufeinander abgestimmt sein. Nur dann, wenn Blickwinkel identisch, Kamerabewegungen synchronisiert und Farb- und Helligkeitswerte aufeinander abgestimmt sind, ergibt die Kombination (fachlich „Compositing“) dieser Bildquellen eine Sequenz aus einem Guss.

Für ein perfektes Compositing bei bewegter Kamera müssen zusätzlich die Kamerabewegungen im real gefilmten

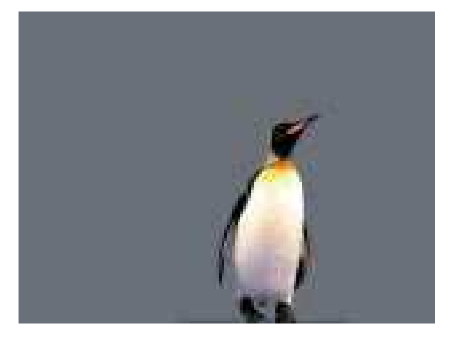
Pinguine in München



Zunächst wurde in den leeren Straßen gedreht und die Kamerafahrten protokolliert.



Die „Hauptdarsteller“ watscheln – bei gleichen Kameraeinstellungen – vor einer blauen Kulisse.



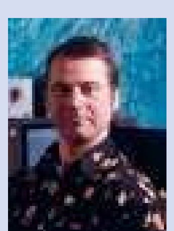
Alle blauen Farbflächen aus den Studioaufnahmen werden per Mausklick eliminiert, weitere störende Objekte wie der Dompteur retuschiert.

Raum mit den Bewegungen des virtuellen Objektes abgestimmt werden. Bei der Darstellung des letzteren unterstellt man eine imaginäre Kamera mit variabler Brennweite und Blende. Um die Bewegung der realen mit der virtuellen Kamera zu synchronisieren, wird zunächst die Bewegung der ersteren im real gefilmten Material analysiert. Hier helfen spezielle „Tracking“-Programme (englisch für „Verfolgen“).

Die Funktion solcher Software demonstrierte das Fernsehen im Irak-Krieg: Aus Flugzeugen aufgenommene Bilder zeigten Gebäude, die trotz der bewegten Kamera wie festgenagelt im Zentrum des Bildes blieben und zu Zielen von Raketen wurden. In der Bildbearbeitung helfen ähnliche Programme, Bewegungen durch den Raum zu analysieren und perspektivische Veränderungen darzustellen. Um wirkliche Kamerafahrten und -schwenks in virtuelle umzusetzen, werden im real gedrehten Material auffällige, kontrastreiche Punkte eines Objekts markiert und ihre Bewegung dann verfolgt (fachlich „Tracking“). In der Regel arbeitet man mit maximal vier solchen Punkte je Objekt; zwei reichen bereits, um auch Größenveränderungen mit variierendem Abstand von der „Kamera“ oder Drehungen im Raum zu erfassen. Die derart gewonnenen Bewegungsdaten können dann auf die virtuelle Kamera übertragen werden. Die Tracking-Software sorgt auch dafür, dass neue, auf einer solchen Markierung „angeheftete“ Bildelemente den Bewegungslinien ebenfalls folgen – diese scheinen mit dem markierten Objekt verwachsen zu sein.

Ob die Mitarbeiter der Postproduction nun aber nur den Filmschnitt vornehmen, Korrekturen durchführen, verschiedene Bildquellen miteinander kombinieren oder Animationen bis hin zu Spezialeffekten einbinden, das Ergebnis muss immer mehr sein als die Anwendung ausgetüftelter Technik. Ein guter „Postproductioner“ spielt auf seinem Instrumentarium mit viel Gespür für die cineastische Wirkung.

Eine solche Meisterleistung boten die Kollegen von ILM mit ihren Wassersimulationen für Wolfgang Petersens „Der Sturm“ (2000). Ein Jahr lang analysierten sie Filmaufnahmen von Wasser und Wellen und Schiffen in schwerer See. Sie entwickelten in dieser Zeit Simulationsreihen, die Verfahren der numerischen Strömungsmechanik für die Wellen und Turbulenzen verwendeten, dynamische Berechnungen von Teil- ▶



Wolfgang Borgfeld *studierte Anglistik und Filmtheorie. Er ist Pressesprecher von „Das Werk“, dem größten europäischen Unternehmen für digitale Postproduktion und Bildgestaltung. Zur Firmen-Gruppe gehört auch „Road Movies Filmproduction“, die unter anderem die Werke des deutschen Regisseurs Wim Wenders produziert.*



In Analogie zum Bluescreen-Verfahren mit Filmmaterial färbt der Computer die verbleibenden Flächen schwarz – es entsteht eine „Maske“.



Anhand dieser Maske werden die Straßenaufnahmen bearbeitet (tatsächlich erfolgt dieser Zwischenschritt ohne weitere Bilderzeugung intern im Computer).



Die aus den Studioaufnahmen freigestellten Pinguine und die bearbeiteten Straßenszenen werden kombiniert.

chensystemen für Spritzer und Gischt. Insgesamt 250 Einstellungen des Films enthielten dann derart modellierte Wassermassen, ein Drittel davon in Kombination mit Realaufnahmen. Dass der Zuschauer glaubt, einem Sturm gigantischen Ausmaßes beizuwohnen, verdankt er nicht nur der Simulation physikalischer Prozesse, sondern auch dem richtigen Quantum „künstlerischer Freiheit“. So stellten die Mitarbeiter von ILM fest, dass einige Berechnungen unecht wirkten, obwohl sie den Vergleich mit Filmdokumenten standhielten. Andererseits steigerten Modifikationen der wissenschaftlich korrekten Simulationsdaten die Dramatik und authentische Anmutung. So ließen sie Wellen schneller brechen oder zwei Wellenberge direkt hintereinander laufen. Stefan Fangmeier, Supervisor für Special Effects bei ILM, erwiderte auf Kritik: „Wir machen hier keinen Dokumentarfilm für National Geographic. Wir sind in Hollywood und müssen durch Überhöhung genau die dramatische Bedrohung erzeugen, die dem Zuschauer den Atem nimmt.“

Hier wird der Spezialist für visuelle Effekte zum Künstler, der mit einem unrealistischen Bildelement die vom Regisseur gewünschte Wirkung erzielt. Auch dieses Können benötigt er nicht nur für spektakuläre Effekte, sondern oft auch im Verborgenen, um die Poesie einer filmischen Erzählung zu ermöglichen. Denn das physikalisch Mögliche liegt beim Film stets in der Nachbarschaft des Unmöglichen, wie eine Szene aus Tom Tykwers „Der Krieger und die Kaiserin“ (2000) zeigt. Hauptdarstellerin Franka Potente hält sich darin eine Muschel ans Ohr und lauscht. Die Kamera fährt immer näher an die Muschel heran, die Schauspielerin verschwindet aus dem Bildfeld, die Schale füllt das Bild, die Kamera fährt weiter vorwärts, in den Gang des Gehäuses hinein.

Eine solche Kamerafahrt ist technisch nicht machbar, denn man benötigte hierfür ein Mikroobjektiv, das noch dazu aus großem Abstand ebenso scharf abbildet wie im Makrobereich und dabei auch noch die sich verändernden Lichtverhältnisse korrigiert. Unsere Effektspezialisten modellierten deshalb Kopf, Muschel und Hand als räumliches Gitternetz, auf das sie dann Aufnahmen des Kopfes von Franka Potente, ihrer Hand und der Muschel texturierten. Nun konnten sie mit einer virtuellen Kamera die von Tykwer gewünschte Fahrt realisieren. Dem Zuschauer fiel das nicht auf, er erlebte das lyrische Moment dieser Sequenz. Die besten Effekte sind schließlich die, die man nicht als solche wahrnimmt. ■

AM RANDE

Wir basteln uns einen Film

Interaktive Technik macht Fernsehen erst richtig schön. Und beliebig

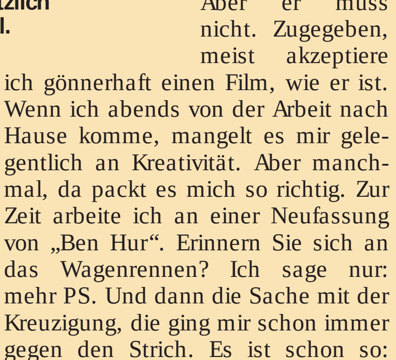
Schau mir in die Augen, Kleines!“ Ilsa schaut, tief und tränenreich. Sie und Rick wissen, dass es keine gemeinsame Zukunft geben kann. Victors Kampf gegen das Nazi-Regime ist wichtiger als das bisschen Glück hier in Casablanca. Schon dröhnen die Motoren des Fliegers, der beide für immer trennen wird …

Nein, das halte ich nicht aus! Selbst in der 120. Wiederholung nicht! Wo bleibt denn da der Spaßfaktor? Also machen wir es anders!



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Casablanca Version 2.1 – plötzlich wendet sich das Schicksal.



Eine Sirene kreischt auf. Rick und Ilsa blicken verwirrt um sich. Jemand ruft: „Eine Bombe, an Bord ist eine Bombe!“ Der Nazi-Scherge Strasser stürzt ins Flugzeug und brüllt: „Ich kriege dich, Victor!“ Bumm! Nazi tot, Victor tot. Trümmer prasseln auf das Rollfeld. Feuersbrunst, Action und – das Traumpaar, hinter einem Wagen liegend. Erschüttert, doch wissend, dass die Zukunft ihnen gehört. Schnitt!

Aaah! Das war schon viel besser. Ein solches Happy End hätte dem Regisseur aber auch selbst einfallen können. Es gibt sicher noch viel mehr Möglichkeiten, „Casablanca“ die entscheidende Wendung zu geben.

Ich bin wirklich froh über mein – allerdings nicht gerade billiges – Abonnement bei „Interactive Digital Entertainment“, die seit 2010 dem Heimkino eine ganz neue Dimension verleihen, eine Art Hollywoodismus: Einmal Steven Spielberg sein – jetzt ist es möglich.

Es gibt ja so viele tolle Filme mit kleinen Schönheitsfehlern. Die Zeit ist gekommen, sie auszubügeln. Warum mussten „Thelma und Louise“ sterben? Wieso schaltet Sigourney Weaver in ihrem „Alien“-Raumschiff nie das Licht an? Muss Woody Allen immer so viel reden? Könnte sich Bruce Willis nicht zwischen zwei Schießereien kurz duschen?

Schluss mit der Diktatur der Regisseure und Produzenten. Die moderne Konsumgesellschaft bietet Anarchie im kontrollierten Anbau: Jeder darf alles bestimmen, wenn er dafür bezahlt. Aber er muss nicht. Zugegeben, meist akzeptiere ich gönnerhaft einen Film, wie er ist. Wenn ich abends von der Arbeit nach Hause komme, mangelt es mir gelegentlich an Kreativität. Aber manchmal, da packt es mich so richtig. Zur Zeit arbeite ich an einer Neufassung von „Ben Hur“. Erinnern Sie sich an das Wagenrennen? Ich sage nur: mehr PS. Und dann die Sache mit der Kreuzigung, die ging mir schon immer gegen den Strich. Es ist schon so: Interaktives Fernsehen bietet wahre Kunst für jedermann.

Klaus-Dieter Linsmeier

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

AUFNAHMETECHNIK

Großer Film für kleines Geld

Digitale Kameras vereinfachen nicht nur die Dreharbeiten. Sie erleichtern auch die Finanzierung – ein Vorteil vor allem für die Independent-Szene.

Von Peter Broderick

Von der Idee zu einem Film bis zu seinem Start in den Kinos können bei einer großen Hollywood-Produktion Jahre ins Land gehen. Geldgeber müssen gefunden werden, die dann bei der Realisierung mitreden. Bei den Aufnahmen gelingen selten mehr als zwei bis sechs Minuten des späteren Films pro Tag, während das Einrichten der Beleuchtung, der Kamerafahrten und Positonsmarken Stunden dauern kann. Das Nachbearbeiten, die so genannte Postproduction, erfordert oft ein Digitalisieren der Filme und braucht eben auch seine Zeit.

Etwas einfacher hat es der Filmemacher der Independent-, also von den großen Studios unabhängigen Szene. Er benötigt keine Millionen-Budgets und kann seine Ideen in Eigenverantwortung umsetzen; freilich erreicht er auch ein kleineres Publikum. Die preiswerte digitale Videotechnik verspricht, seine Situation noch zu verbessern, denn sie schickt sich an, der konventionellen Aufnahme Konkurrenz zu machen. Selbst Handycams für den privaten Gebrauch liefern schon ansprechende Bilder; ihre qualitativen Mängel setzen unabhängige Filmemacher mitunter bewusst als atmosphärisches Mittel ein, wie etwa beim Kassenschlager „The Blair Witch Project" (1999): Den Film zu produzieren kostete 32000 Dollar, er spielte aber allein in den USA mehr als 140 Millionen ein.

Neben solchen Handycams gibt es professionelle Systeme wie digitale Betacams, die es mit dem 16-Millimeter-Film aufnehmen können, und seit dem letzten Jahr auch eine Konkurrenz zum 35-Millimeter-Film: Kameras für das so genannte HDCAM-Format zeichnen wie herkömmliche Filmkameras 24 Bilder pro Sekunde auf Video auf, nur eben digital (im Fachjargon bezeichnet man diese Technik als 24P). Allerdings ist die Auflösung bei diesem Videoformat nur halb so gut wie beim analogen Filmmaterial (siehe Kasten Seite 90/91).

Vorteil Nummer Eins würde bei einem Studiofilm wohl unter „Peanuts" rangieren, schlägt bei Low-Budget-Produktionen aber schon zu Buche: Zelluloid ist eine teure Ressource. Für einen abendfüllenden Spielfilm in 35-Millimeter-Qualität belaufen sich die reinen Materialkosten auf etwa 50000 Mark (der Film ist im Durchschnitt 2500 Meter lang, die siebenfache Menge wird beim Dreh verbraucht).

Ein unabhängiger Filmemacher wird zu Anfang abschätzen, welches Budget er leicht aufbringen kann und welche Ausrüstung, Mannschaft und Schauspieler ihm zur Verfügung stehen, um seine künstlerische Idee umzusetzen. Vielleicht erst danach und diesen Vorgaben entsprechend entsteht das Drehbuch, ohne dass externe Finanziers hineinreden können. (Den „normalen" Ablauf einer Hollywood-Produktion schilderte Robert ▶

NEXT WAVE FILMS



Independent-Filmemacher drehen gern mit digitalen Videokameras, wie hier bei „Paper Chasers" von Maxie Collier, einer Dokumentation über die HipHop-Szene.

Der Dreh mit dem Chip

Digitalkameras nehmen Bilder elektronisch, mit so genannten CCD-Chips auf. Die binären Daten werden auf einem Videoband gespeichert. Über ein spezielles Kabel werden sie einem Computer übertragen und dann ohne Qualitätsverlust bearbeitet. Um den fertigen Film in einem gewöhnlichen Kino zu zeigen, muss man ihn auf Zelluloid belichten. Als George Lucas verkündete, dass die zweite und die dritte Folge der neuen Krieg-der-Sterne-Trilogie mit hochauflösenden Kameras gedreht werde, spornte er die Unternehmen Sony und Panavision an, neue Digitalkameras zu entwickeln. Die haben ungefähr die doppelte Auflösung ihrer Vorgänger und nehmen wie eine herkömmliche Kamera 24 Einzelbilder pro Sekunde auf (24P-Verfahren). Die dahinter stehende HDCAM-Technik ist übrigens ein Derivat des Standards für hochauflösendes Fernsehen, HDTV (High definition television).

Ein Prisma spaltet das Licht auf
Charge-Coupled Devices (CCD´s)
Codeumsetzer
Chip für das Kodieren und Dekodieren
Analog/Digital-Wandler
Verbindungskabel
Übertragen der Information für die Nachbearbeitung
Nachbearbeitete Version wird auf Band gespeichert
Computer
Der Film wird am Bildschirm betrachtet oder auf Video aufgenommen
Fernseher und Videorecorder
Das Signal kann für die Satellitenübertragung verschlüsselt werden
Digitalprojektor

Altmans Satire „The Player“ (1992): Ein sozialkritisches Drama über die Todesstrafe geriet aus kommerziellen Erwägungen letztlich zum Actionfilm mit Starbesetzung und Happy End.)

Der Gedanke, mit vorhandenen Ressourcen auszukommen, charakterisiert die Arbeit von Independent-Künstlern. So drehte der damals 22-jährige Robert Rodriguez seine Gangstersatire „El Mariachi“ mit rund 7000 Dollar (Kinostart 1992). Darin schilderte er die Probleme eines Gitarristen, der in einer mexikanischen Grenzstadt für einen Killer gehalten wird (weil dieser seine Waffe in einem Gitarrenkoffer zu befördern pflegt).

Kreatives Sparen

Rodriguez besaß einen Hund und einen Schulbus, dementsprechend kam diesen beiden eine wichtige Rolle im Film zu (der Regisseur drehte wenig später gemeinsam mit Quentin Tarantino den Kult-Horrorfilm „From Dusk Till Dawn“). Kevin Smith nutzte für eine Komödie über das Erwachsen-Werden – „Clerks“ („Die Ladenhüter“, 1994) – den Tante-Emma-Laden, in dem er selbst damals arbeitete.

Weil die Kosten für das Filmmaterial und seine Entwicklung wegfallen, darf eine digitale Kamera ruhig mal „auf Verdacht“ mitlaufen. Ohne sein Budget zu strapazieren kann der Regisseur experimentieren, um eine Szene optimal umzusetzen. Selbst Aufnahmen während der Proben schlagen kaum zu Buche – manch eine mag sich im Nachhinein als besonders lebendig erweisen. Auch die Schauspieler profitieren: Wenn eine Einstellung nicht auf Anhieb gelingt, wird der Auftraggeber zumindest nicht aus finanziellen Gründen nervös. Zudem ist das Equipment so günstig zu leihen, dass sogar zwei Kameras gleichzeitig laufen können.

Damit nicht genug sind elektronische Kameras lichtempfindlicher als herkömmliche Filmemulsionen. Das vereinfacht die Ausleuchtung einer Aufnahme und kann die Einstellungen der Scheinwerfer deutlich verkürzen. Der Münchner Produzent und Kameramann Stefan Jonas drehte im letzten Jahr den ersten Kinofilm mit einer 24P-Kamera: „Rave Macbeth“ versetzt die Shakesspeare-Tragödie in die Club-Szene (Budget: 3,3 Millionen Dollar, Kinostart 2001). Jonas kam nach eigenen Angaben mit der Hälfte des Lichtes aus, mit entsprechend reduzierten Kosten für Scheinwerfer und Beleuchter-Stunden. Insgesamt schätzt er die Einsparungen durch die Digitalkamera auf etwa 150000 Mark.

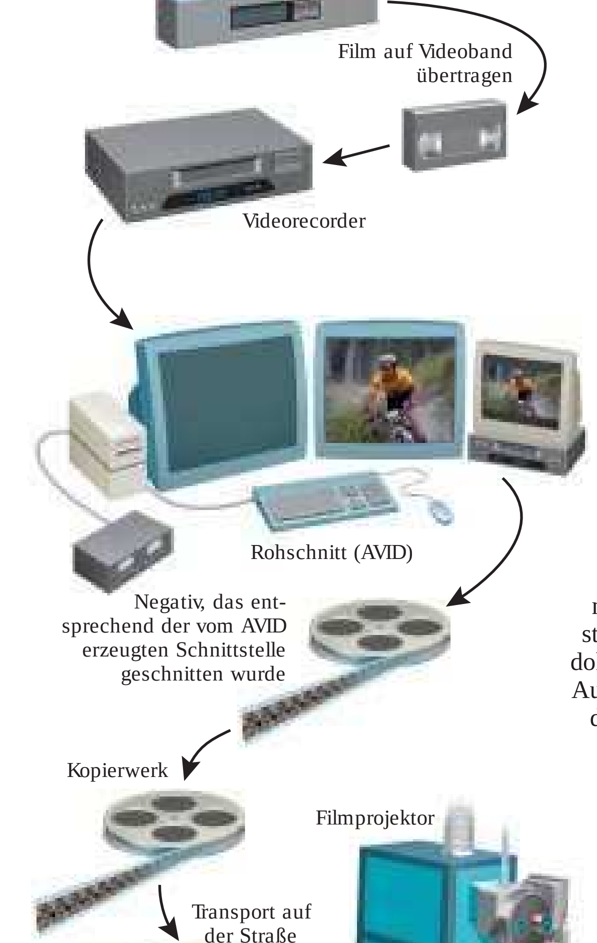
Ein weiterer Vorteil: das Ergebnis einer Aufnahme sieht der Regisseur nicht erst nach Tagen der Filmentwicklung, sondern sofort am Set. Das ist wohl unter künstlerischen Aspekten der entscheidende Vorteil dieser Technik. Er kann auch jederzeit Aufnahmen zurückspulen und entscheiden,

Bewährt: Computer und Chemielabor



Eine traditionelle Filmkamera nimmt 24 Bilder pro Sekunde auf. Dabei fällt das Licht auf einen 16- oder 35-mm-Film auf Acetatbasis. Er trägt drei Schichten Silberhalogenid-Emulsion, die jeweils für Rot, Grün oder Blau empfindlich sind. Nach dem Entwickeln tastet eine so genannte Telecine-Maschine die Negative ab und legt die binären Daten auf einem Videoband oder einer Festplatte ab. Für den Schnitt verwendet man dann ein Computersystem, Marktführer ist die Firma AVID. Die Informationen über die Schnittfolge werden in einer EDL (edit decision list) erfasst, die genau festlegt, welche Teile des Original-Negativs in welcher Reihenfolge verwendet werden. Das Negativmaterial wird anhand dieser Liste geschnitten, der fertige Film wird auf ein Positiv kopiert, von dem dann in Kopieranstalten für die Distribution in den Kinos Kopien gezogen werden.

GEORGE RETSECK



welche Variante einer Szene es wert ist, sie weiter zu verfolgen – vorausgesetzt, er hat auch einen hochauflösenden Monitor zur Verfügung.

Film ist immer Fiktion, also ein Arrangement von Menschen und Situationen, das sich in der Wirklichkeit niemals so ergeben hat. Menschen agieren an Orten, die vielleicht nur aus gemalten Hintergründen (so genanntes Matte painting) und Miniaturmodellen bestehen, Objekte fliegen durch die Luft, während sich in Wahrheit eine computergesteuerte Kamera bewegt hat (so genanntes Motion control) und dergleichen mehr. Manchmal aber sucht ein Filmemacher gerade die wirkliche Welt statt der Inszenierung, weil er den dokumentarischen Charakter solcher Aufnahmen schätzt oder gar unbedingt braucht, um seine Vorstellungen zu verwirklichen.

Dafür bietet die unauffällige Videokamera vielfältige Möglichkeiten. Wohl in kaum einem anderen Film wird das so deutlich, wie in Paul Wagners „Windhorse“ (US-Kinostart 1996). Die Story übt Kritik an der chinesischen Besetzung Tibets: Als eine buddhistische Nonne gegen ein Verbot protestiert, Bilder des Dalai Lama öffentlich zu zeigen, wird sie verhaftet und gefoltert. Jugendfreunde versuchen daraufhin unter großer Gefahr eine Videoaufnahme der Misshandelten außer Landes zu schmuggeln, um so die Verletzung der Menschenrechte in Tibet zu beweisen. Einen Großteil der Szenen drehte Wagner in Katmandu mit einer professionellen Digitalkamera, doch einige Aufnahmen gelangen in Lahsa selbst: Das Filmteam tarnte sich als Touristengruppe und benutzte – ohne Drehgenehmigung – eine kleinere digitale Videokamera.

Wer von Anfang an Filme in Bits und Bytes macht, senkt auch die beim Postprocessing entstehenden Kosten. Ob spektakuläre oder subtile Effekte gefragt sind oder schlicht ein guter Schnitt: Der Computer ist hier längst ein unentbehrliches Werkzeug geworden.

Im letzten Schritt einer Filmproduktion vor dem Vertrieb werden die Daten des fertigen Kunstwerks (oder auch eines Werbefilmes) wieder auf Zelluloid belichtet, um sie in den Kinos zu zeigen. Daran dürfte sich in naher Zukunft einiges ändern. Die Lichtspielhäuser werden nicht nur über digitale Filmprojektoren verfügen, die Informations- und Kommunikationstechnik bietet bereits neue Distributionswege an. Wenn es dem Produzenten nicht gelingt, einen Händler zu begeistern, der seinen Film in die Kinos bringt, reicht sein Mastervideo auch für Fernsehübertragungen via Kabel oder Satellit, außerdem für die Herstellung von Heimvideos, DVDs oder gar eine Verteilung über das Internet.

Insbesondere im Independent-Bereich könnten letztere Möglichkeiten für ▶

das Überleben dieser Kunstform von entscheidender Bedeutung sein. Denn mit den preiswerteren Produktionstechniken wird sich die Zahl der jährlich nicht für Hollywood gedrehten Filme bald verdoppeln – zumindest in den USA. Das dürfte ihren Vertrieb in die Kinos noch schwieriger machen. Doch jeder Cineast mit einem Internetanschluss kann sich einen Trailer online ansehen und das entsprechende Video zuschicken lassen. Und wenn in einigen Jahren der Breitbandzugang Standard wird, sind auch komplette Downloads oder Online-Betrachtung (Video-Streaming On Demand) möglich. Mittlerweile gibt es im World Wide Web bereits Anbieter für Kurzfilme, von denen manche eigens für dieses Medium gedreht wurden (einige davon mit wirklichen Schauspielern und anderen Themen als Sex und Gewalt. Die Redaktion). Die geringere Auflösung des Bildschirms senkt die Anforderungen an die Aufnahmetechnik und damit wieder die Produktionskosten.

Hollywood selbst wird noch eine Weile brauchen, bis es diese Techniken in vollem Umfang und selbstverständlich nutzt. Auch wenn George Lucas die nächsten Folgen der „Star Wars“-Trilogie digital drehen will – die großen Studios haben erhebliche Mittel in einen Produktionsprozess investiert, der über Jahrzehnte Standard war. Die Diskussion, ob das Zelluloid „tot“ ist, wird denn weltweit heftig geführt – wer sein Geld in die falsche Technik steckt, kann leicht vom Markt verschwinden.

Unabhängige Filmemacher hingegen profitieren. Ihnen geben digitale Werkzeuge mehr Raum für Kreativität und Spontaneität. Letzten Herbst fragte ich einen Regisseur, wann er seinen Film beenden wird. Er antwortete: „Heute Nacht, wenn es regnet.“ ■



***Peter Broderick** leitet die amerikanische Firma Next Wave Films, die Independent-Filme finanziert. Wolfgang Borgfeld von „Das Werk“ und Peter Willems von ID-TV lieferten fachlichen Rat bei der Bearbeitung des Artikels.*

Digitale Filmkamera

Noch hapert es an den Gestaltungsmöglichkeiten

Bot Sony mit dem Video-Format Digital Beta eine Alternative zur konventionellen 16 mm-Kamera, greift das Unternehmen jetzt mit dem vom High Definition Televison (HDTV) abgeleiteten Aufzeichnungsformat HDCAM den 35 mm-Film an. Das mit der zugehörigen Kamera mit dem aufschlussreichen Namen HDW F-900 aufgenommene Material lässt sich digital weiterbearbeiten, auf Film ausbelichten, über digitale Projektoren abspielen oder einfach in die Fernsehformate PAL (Europa) und NTSC (USA) wandeln.

Im Unterschied zu Digital Beta erlaubt HDCAM eine Aufzeichnung von 24 Einzelbildern pro Sekunde – daher die Bezeichnung 24p. Dies entspricht eher dem Verfahren von analogen Filmkameras als die Formate der bisherigen Videotechnik: Gerade sowie ungerade Zeilen eines Bildes werden dabei nacheinander aufgenommen; in der Summe ergeben sich dann bei NTSC 30 Einzelbilder pro Sekunde, bei PAL 25.

DAS WERK

Kameramann Stefan Jonas drehte „Rave Macbeth“ mit der Sony-Digitalkamera.

Damit nicht genug der Ähnlichkeiten, stattete Sony seine Kamera mit allerlei Zubehör aus, das dem Kameramann vertraut ist. Das Ergebnis ist durchaus beachtlich, wie erste 24P-Filme zeigen, etwa Wim Wenders Musikvideo zum „Million Dollar Hotel“ oder der Kurzfilm „Gone Underground“ von Michael Ballhaus. Doch an den 35 mm-Film kommt die Bildqualität der HDCAM längst noch nicht heran. Der bietet eine Auflösung von 12,5 Millionen Bildpunkten (Pixeln), das sind 4000 Pixel in einer horizontalen Zeile, verkürzt als „4K“ bezeichnet. Die HDCAM erreicht 1920 horizontale Pixel, also nur 2K. Das allein ist aber noch kein Argument, wie die Befürworter von 24P betonen, denn in der Projektion liefert auch diese geringere Auflösung durchaus gute Bilder, oft bessere als eine mittelmäßige Filmkopie.

Der wichtigste Unterschied aber ist das Abtastformat. Die HDCAM wie auch erste Geräte der Mitbewerber verwenden lichtempfindliche Chips, so genannte CCD-Bildwandler (*charged coupled devices*) mit einer Diagonalen von 18 Millimetern – beim 35 mm-Filmbild ist sie 26 Millimeter lang. Damit erfordern die digitalen Systeme andere Brennweiten, beispielsweise hat ein Normalobjektiv dann eine Brennweite von 13 Millimetern, eines für das konventionelle Gerät hingegen eine von 32 Millimetern. Je länger die Brennweite, desto kleiner ist der Bereich vor und hinter der eingestellten Entfernung, der scharf abgebildet wird. Wenn ein Zuschauer vom „Kino Look“ spricht, meint er aber meist die von einer Fernsehkamera nicht erreichte Schärfentrennung von Vorder- zum Hintergrund, die dem Kameramann viel Freiheiten zur Gestaltung einer Aufnahme gibt.

Es dürfte freilich nur eine Frage der Zeit sein, bis die Hersteller CCD-Bildwandler mit größeren Bilddiagonalen anbieten. Auch andere Vorteile konventioneller Systeme wie eine höhere Bildfrequenz – Voraussetzung beispielsweise für Zeitlupenaufnahmen – dürften in einigen Jahren zur Ausstattung digitaler Kameras gehören.

Derzeit sind Fotoemulsionen für professionelle Filme lichtempfindlicher als die CCD-Chips und haben vor allem einen größeren Dynamik-Bereich: Von dem weißen Kleid und dem schwarzen Anzug eines Brautpaares kann das analoge Filmmaterial mehr Helligkeitsabstufungen liefern als die digitale Videokamera, die einen solchen Kontrastumfang aber mittels elektronischer Korrekturen bewältigen kann. Videotypische Bildfehler wie harte Konturen bei Hell-Dunkel-Sprüngen lassen sich bei professionellen Digital Beta-Camcordern bereits elektronisch gut ausgleichen.

Hans Albrecht Lusznat

Der Autor ist Kameramann. Seine Spezialität sind Steadycams, also Kameras, die durch eine Aufhängung ruckfreie Aufnahmen ermöglichen.

Literaturhinweise und *Weblinks* zum Thema finden Sie im Internet: ***www.spektrum.de/aktuellesheft.html***

ANIMATION

Ein Double für E-Sha

Motion-Capturing-Verfahren zeichnen Bewegungen realer Schauspieler bis hin zur Mimik auf, um computergenerierte Figuren zu animieren.

Von Dejan Momcilovic und Sebastian Dietrich

Pacman, die Mario Brothers und Donkey Kong – die ersten digitalen Charaktere waren wenig real wirkende Helden in Computerspielen. Mittlerweile avancieren Avatare, wie man die virtuellen Personen nennt, zu Stars in Werbespots oder Musikvideos. Besonders problematisch für ihre Entwickler sind Bewegungen, insbesondere der Gesichtszüge.

Tatsächlich empfiehlt es sich oft, die Bewegungen eines wirklichen Menschen aufzuzeichnen und dann auf das künstliche Wesen zu übertragen. Ein solches „Motion Capturing" für kommerzielle Anwendungen entwickelte der amerikanische Werbefilmer Bob Abel 1984 für den Spot „Brilliance". Ein weiblicher Chrom-Roboter sollte darin als Sprecherin der nationalen Vereinigung von Dosenfutterherstellern auftreten. Abels Team steckte eine Schauspielerin in ein hautenges Trikot und zeichnete darauf 18 Markierungen mit schwarzem Filzstift. Ihr Spiel, die „Performance", nahmen sie aus verschiedenen Winkeln auf und digitalisierten den Film. Anhand der Daten über Brennweiten, Kameraausrichtungen und –positionen ermittelten die Tricktechniker aus den Markeraufnahmen deren Position (die Annahme dabei: Markierungen befinden sich in den Kreuzungspunkten idealisierter Lichtstrahlen, die auch durch die Objektive verlaufen). Die Berechnungen, per Hand in wochenlanger Arbeit durchgeführt, lieferten Bewegungskurven der einzelnen Gelenke. Auf entsprechende Körperpunkte des computergenerierten Roboters übertragen, verhalfen sie ihm zu überzeugenden Aktionen. Dank „Brilliance" hielt das so genannte Optische Motion Capturing trotz hoher Kosten Einzug in die Fernseh- und Filmindustrie.

Mittlerweile gibt es verschiedene Verfahren, die sich vor allem hinsichtlich Genauigkeit und Aufwand unterscheiden. Ihnen allen ist gemein: Menschen liefern Bewegungsdaten, die auf ein Skelett aus geometrischen Formen, so genannten Polygonen, übertragen werden. Professionelle Motion-Capturing-Systeme, Software für eine automatische Auswertung der digitalen Bilder eingeschlossen, erleichtern dem Animateur die Arbeit.

Die höchste Präzision erreicht nach wie vor die geschilderte optische Variante, das heißt das Aufnehmen des sich bewegenden „Performers", der selbstleuchtende oder Licht reflektierende Marken trägt. Die Komplexität menschlicher Bewegungen erfordert oft mehrere Marker pro Gelenk. Heutige Systeme erfassen oft mit Dutzenden von Kameras Hunderte solcher Punkte mit bis zu 1000 Bildern pro Sekunde. Die Software erhält von ihnen Raumkoordinaten, bestimmt daraus Bewegungskurven für jeden Marker und überträgt diese auf die korrespondierenden Punkte des virtuellen Skeletts (während ein Avatar für das Internet aufgrund der meist geringen Datenraten nur recht grob aus relativ wenigen solcher Vielecke aufgebaut sein kann, umfasst eine Figur wie E-Cyas theoretisch unendlich viele: Nähert sich die virtuelle Kamera, wird der entsprechende Bereich immer feiner unterteilt).

Der Aufwand lohnt sich: Die Bewegungen von Avatar und Performer stimmen dann auf bis zu zwei Millimeter überein. Das gelingt sogar in Echtzeit, das heißt: Mensch und Maschinenwesen führen zeitgleich identische Aktionen aus. Dies kommt bei Live-Auftritten zum Einsatz, meist arbeitet dabei der Performer hinter der Bühne, allein schon, um störende Blitzlichter aus dem Zuschauerraum zu vermeiden. Solche High-End-Systeme werden aber auch von Orthopäden genutzt, etwa um Bewegungsabläufe von Leistungssportlern zu optimieren oder Haltungsschäden zu untersuchen. Diese Präzision hat allerdings ihren Preis: Zehn HighSpeed-Kameras, die mit Stroboskopen Lichtblitze zu den reflektierenden Markern senden sowie die Hard- und Software für die Digitalisierung und Auswertung der Videodaten kosten bei der genannten Genauigkeit etwa 300 000 US-Dollar.



I-D MEDIA

E-Sha – ein virtueller Videostar

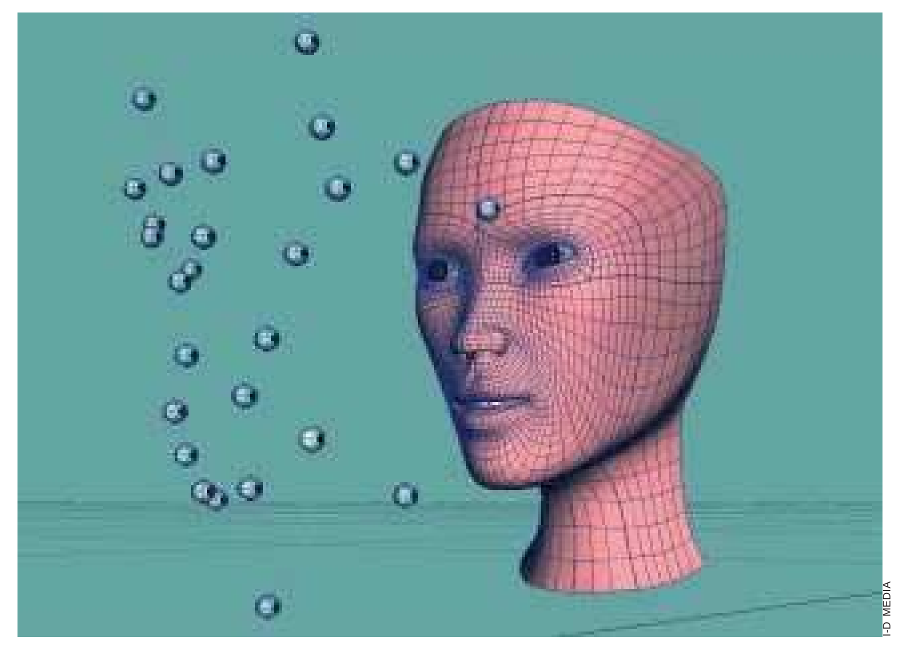
Nur mit etwa einem Sechstel davon schlägt das elektromagnetische Motion Capturing zu Buche. Der Performer bewegt sich in einem Magnetfeld. Als Markierungen trägt er Sensoren, die Lage, Entfernung und Winkel zum Sender des Feldes erfassen und einer Steuereinheit übermitteln. Diese berechnet nicht nur Koordinaten, sondern auch die Ausrichtung der Sensoren im Raum. Solche Systeme sind weit verbreitet, zumal sie in Echtzeit leichter zu handhaben sind. Allerdings lassen sich nicht so viele Sensoren einsetzen wie Stiftmarkierungen (reflektierende Marker) bei der optischen Variante. Außerdem mindern metallische Gegenstände in der näheren Umgebung die Qualität der Daten.

Die einfachste und älteste Variante des Motion Capturing schließlich nutzt einen elektro- ▶



I-D MEDIA

Reflektierende Marker für das Motion Capturing



Ein Zwischenschritt beim „Motion Capturing“ der Gesichtsmimik: Markerpositionen auf dem Gesicht eines Schauspielers (Kugeln) werden auf das Modell übertragen.

mechanischen Anzug, bei dem die Rotation der Gelenke durch Drehwinkelsensoren gemessen wird. Leider bieten solche Anzüge meist nur wenig Bewegungsfreiheit, die Systeme sind überdies aufgrund der mechanischen Komponenten sehr fehleranfällig. Das größte Manko aber ist, dass die Sensoren zwar die Körperaktionen, nicht aber die Position des Schauspielers im Raum messen können. Ein derart animierter Avatar beginnt leicht zu „schwimmen“: Scheinbar ohne Bodenkontakt tanzt er auf der Stelle.

Aus diesem Grunde entschied sich unser Unternehmen, bei der Realisierung eines Musikvideos das optische Motion Capturing einzusetzen. Das Konzept verlangte eine zur Musik passende virtuelle Umgebung, in der ein weiblicher Avatar agiert, dabei aber so „echt“ wie möglich wirkt. Wir kreierten E-Sha, eine attraktive Sängerin und Tänzerin. Ihrem natürlichen Vorbild stand eine Fläche von fünf mal sieben Metern zur Verfügung, die teilweise mit Podesten versehen war, um Sprünge zu ermöglichen, wie sie E-Sha in den Computerlandschaften vollführen sollte. Zehn Kameras nahmen die mit 36 Markern versehene Tänzerin 120-mal pro Sekunde auf. Das „Skelett“ E-Shas wurde in dreißig gelenkig verbundene Segmente unterteilt, davon neun für die Wirbelsäule.

Um die Bewegungen so natürlich wie möglich zu gestalten, übertrugen die Animateure nicht nur die einzelnen Marker-Koordinaten Bild für Bild auf die korrespondierenden Punkte des Avatars, sondern analysierten die Daten von zwei oder drei realen Markern auf gemeinsame Bezüge hin und übertrugen diese auf virtuelle. Insbesondere die oftmals problematischen Bewegungen der gelenkigen Verbindungen wirkten dadurch sehr realistisch.

E-Sha sollte aber nicht nur tanzen, sondern auch singen. Es lag nahe, auch die Gesichtsmimik mittels Motion Capturing zu erfassen. Weil im Handel erhältliche Werkzeuge nicht die gewünschte Qualität lieferten, entwickelten wir ein eigenes System. FaceCap verwendet nur Gesichtsmuskeln, die laut Studien für eine natürlich wirkende Mimik besonders wichtig sind. Davon wurden 25 ausgewählt und teilweise noch in Segmente unterteilt, beispielsweise um die Bewegungen des ringförmigen Lippenmuskels differenziert zu erfassen. Diesen Segmenten entsprachen Marker, die der Schauspieler trug, sowie virtuelle Marker auf den Flächen des modellierten Gesichts. Damit ließ sich die Mimik recht gut erfassen, doch Handkorrekturen blieben häufig notwendig. Besonders schwer ist es, die Kontraktionen einzelner Muskeln zu isolieren, da beispielsweise um den Mund herum fünf und mehr gleichzeitig arbeiten.

Freilich stößt auch das Motion Capturing an seine Grenzen, und dann ist der Animateur auf seine Kreativität angewiesen. Eine Filmsequenz von wenigen Minuten erfordert dementsprechend oft Wochen an harter Arbeit. Doch die Mühe lohnt sich: Nur wenn virtuelle Figuren anscheinend den gleichen physikalischen Gesetzen unterliegen wie die Zuschauer, wirken sie im Film auch glaubhaft. ■

Der Mediendesigner ***Dejan Momcilovic*** *leitet den Bereich Motion Capturing des Geschäftsbereichs Fernsehen (ID-TV) der I-D Media AG.* ***Sebastian Dietrich*** *ist Sprecher der Aktiengesellschaft.*

PROJEKTIONSTECHNIK

Kino für Computerfreaks

Die digitale Projektion ist noch nichts für das Kino um die Ecke. Doch die Vorteile sprechen für sich.

Von Peter D. Lubell

Seit seinem ersten Krieg-der-Sterne-Film, vor 24 Jahren, war George Lucas immer einer der Ersten, wenn es darum ging, neue Technologien in der Filmindustrie zu verwenden. In seinem letzten Werk, „Episode I – Die dunkle Bedrohung“, gab es fast 2000 Szenen mit digitalen Effekten. Aber Lucas ging noch einen Schritt weiter: Beim Kinostart im Sommer 1999 wurden einige Aufführungen in digitaler Technik realisiert. Klangqualität, Schärfe und Klarheit der Bilder schlugen das Publikum jeweils in ihren Bann. Dennoch hat diese gute Werbung der digitalen Projektion keinen Massenmarkt eröffnet – sie ist schlicht noch zu teuer.

Herkömmlich werden von einem fertig bearbeiteten Master-Film mehrere Negativ-Kopien gezogen und davon dann Tausende von Positiv-Rollen produziert, die ein Vertriebsunternehmen den angeschlossenen Kinos schickt.

Auch das digitale Kino erfordert den Master-Film, sofern nicht von vornherein in Bits und Bytes gearbeitet wurde. Die Einzelbilder werden gescannt bezie-

hungsweise digitalisiert und in das zur Projektion benötigte Format konvertiert. Das Endprodukt ist eine extrem große Datei von durchschnittlich 1000 Gigabyte. Für die Vorführungen 1999 wurden die Dateien auf Festplatten an die Test-Filmtheater geliefert. Bei späteren Demonstrationen von Disney-Filmen mit geringerer Auflösung dienten digitale Videodisks (DVDs) als tragbare Speichermedien. Ideal wäre freilich der Versand via Kabel oder Satellit, doch das erfordert sehr leistungsstarke Breitband-Zugänge, die hohe Datenraten bewältigen können.

Bei den Tests 1999 kamen die miteinander konkurrierenden Projektionstechniken von Hughes-JVC Technology und der DLP-Abteilung von Texas Instruments zum Einsatz. Disney wählte Ende 1999 die DLP-Technik für die digitale Aufführung einiger Filme wie „Tarzan", „Toy Story 2" und „Mission to Mars" in zwölf Orten der USA und einigen außerhalb.

Ein digitaler Projektor verwendet das dreifarbige Rot-Grün-Blau-System (RGB), das zum ersten Mal 1801 von Thomas Young vorgeschlagen wurde. Es bildet auch die Grundlage der Farbfotografie, des Fernsehens und der Computermonitore. Jedes farbige Bild, das vom menschlichen Auge wahrgenommen wird, ist aus diesen drei Farben zusammengesetzt.

Beim DLP-Projektor spalten Prismen hochenergetisches weißes Licht (5000 Watt) einer Xenon-Lichtquelle in diese drei Farben auf und leiten sie separat auf einen so genannten DMD. Die Abkürzung steht für *digital micromirror devices*. Jeder dieser drei Minispiegel besteht seinerseits aus einem Raster von 1280 auf 1024 computergesteuerten Spiegeln, die nur so viel Licht einer Farbe zur Leinwand reflektieren, wie es die in der Filmdatei angegebene Intensität verlangt.

Ein Digitalfilm-Projektor ist genauso groß wie ein Standard-35-mm-Projektor und lieferte 1999 die gleiche Auflösung: 2000 horizontale Linien mit einem Kontrast-Verhältnis (Weiß zu Schwarz) von 1000 zu 1. Die Zahlen übersteigen die Leistungsfähigkeit selbst hochauflösender Fernsehschirme bei weitem, erreichen aber noch nicht die Leistungsmarken der 70-mm-Filme, die bei hoch budgetierten Blockbustern nach Art von „Krieg der Sterne" üblich sind: 3000 Linien und ein Kontrast-Verhältniss von 1200 zu 1.

Die Entwicklung dürfte aber weitergehen, denn das digitale Kino ist auch in finanzieller Hinsicht für die Filmindustrie interessant. Sie gibt im Jahr etliche Milliarden für Herstellung und Transport der Zelluloid-Filmrollen aus, in den



PWE / DEFD

George Lucas letzter Film „Die dunkle Bedrohung" wurde auch digital projiziert.

USA sind es derzeit bis zu 5000 Kopien à 2000 Dollar, die Kosten für Versand und Logistik nicht eingerechnet. Nach etwa dreißig Aufführungen muss eine solche Kopie ersetzt werden. Festplatten ausreichender Kapazität kosten weniger als 15000 Dollar, halten beliebig lange und erlauben preiswerte und schnelle Kopien.

Vorteilhaft wäre es, könnte man die Filme digital über Satellit oder Kabel verschicken, eventuell sogar gleichzeitig an mehrere Filmtheater. Boeing hat im letzten Jahr aus diesem Grund die Houghes-Satellitensparte von General Motors gekauft und will darüber bald Tausende von Filmen gleichzeitig an Kinos in der ganzen Welt verschicken, nicht zuletzt auch an seine eigenen Flugzeuge. Cisco Systems und die 20th Century Fox demonstrierten im vergangenen Sommer den elektronischen Transfer via Internet. Anlass dafür war Supercomm, eine Computer-Konferenz in Atlanta, die sich mit Kommunikation beschäftigte. Die Übertragung der komprimierten 42-Gigabyte-Datei des animierten Films „Titan A. E." dauerte über Hochgeschwindigkeits-Verbindungen ungefähr zwei Stunden.

Leider nutzt diese Technik hauptsächlich den Filmstudios; Kinobetreiber würden mit erheblichen Umstellungskosten belastet: Ein digitaler Projektor kostet 250|000 Dollar, ein herkömmlicher nur 50000. Hinzu kommen enorme Aufwendungen für Umbauten und die Anpassungen der Audio-Anlagen. Studios und Hersteller haben deshalb Modelle für eine Kostenteilung vorgeschlagen, beispielsweise zinslose Darlehen für die Projektoren und unterschiedliche Eintrittspreise für Film- und digitales Material. Bislang blieben die Kinobetreiber unbeeindruckt. Es werden wohl noch einige Jahre ins Land gehen, bis digitale Projektoren Standard sind. ■

Peter D. Lubell *ist Berater für Telekommunikation bei dem Unternehmen Communications Strategies in Albertson (New York) und* adjunct professor *an der Technischen Universität New York.*

GEOMETRIE-WOCHENENDE

Fraktal zum Anfassen

Mathematik-Begeisterte haben die „dritte Iterationsstufe des fraktalen Ikosaeders“ als begreifbares Objekt hergestellt.

Von Christoph Pöppe



IWF GÖTTINGEN

Das vollendete Werk; im Hintergrund eine Variante aus 144 Dodekaedern nach der Iterationsvorschrift von Stephan Werbeck

Abstrakt ist der Körper schnell beschrieben: Man nehme ein Ikosaeder (den platonischen Körper aus 20 Dreiecken) und ersetze es durch zwölf kleine Ikosaeder, indem man die kleinen Ikosaeder passgenau von innen in die Ecken des großen setzt; der Verkleinerungsfaktor ist so gewählt, dass die Ikosaederchen einander gerade berühren, und zwar entlang ganzer Kanten. Dann wiederhole man diesen Ersetzungsprozess mit jedem der kleinen Ikosaeder, und so weiter – im Prinzip unendlich oft. Wilhelm Sternemann, Lehrer aus Lüdinghausen, hat sich dieses Fraktal ausgedacht und beschrieben (Spektrum der Wissenschaft 11/2000, S. 116).

Aber kann man ein solches Gebilde auch in der Realität herstellen? Das Fraktal im mathematischen Sinne sicher nicht. Unendlich viele unendlich kleine Ikosaeder an den richtigen Platz zu setzen – was immer das heißen mag – würde die physischen Möglichkeiten jedes Konstrukteurs überfordern, von seiner Geduld ganz zu schweigen. Man muss sich mit endlich vielen Ersetzungsprozessen begnügen – sagen wir drei. Das ist zwar weit weniger als unendlich, aber immerhin noch realisierbar; denn da insgesamt 12^n Ikosaeder zu bauen sind, wobei n die Zahl der Ersetzungsakte bezeichnet, kommt man für $n = 3$ bereits auf beachtliche 1728 Stück.



MARCUS SCHLAF

Zur Endmontage türmen Wilhelm Sternemann (vorn) und die „Vollender“ die zwölf fraktalen Ikosaeder der zweiten Stufe aufeinander.

Um dieses große Werk gemeinsam zu schaffen, hatten Spektrum der Wissenschaft und die Ludwig-Maximilians-Universität München zu einem Geometrie-Wochenende im Januar gerufen; und der Zuspruch übertraf alle Erwartungen. Reichlich 150 Leute im Alter zwischen 11 und 78 Jahren bauten am Samstag zwölf Näherungen der zweiten Stufe mit je 144 Ikosaedern aus Bastelbögen zusammen; die Endmontage fand unter den Augen des Prorektors der Universität, Axel Schenzle, am Sonntagvormittag statt.

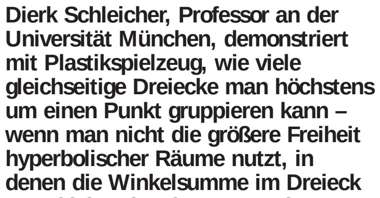
Zwei andere geometrische Großprojekte fielen quasi nebenbei ab, weil das große Werk in den späten Stadien der Fertigstellung nicht mehr alle Hände auslasten konnte. Nach einem sehr ähnlichen Iterationsprinzip von Stephan Werbeck aus Thessaloniki bauten wir ein Gebilde aus 144 Dodekaedern. Und was wie ein großes Dodekaeder aussieht, in das 119 kleinere, zum Teil stark verzerrte Dodekaeder eingebettet sind, ist „in Wirklichkeit“ nur die Art Schatten eines vierdimensionalen platonischen Körpers aus 120 gleichen, regelmäßigen Dodekaedern.

Der wissenschaftliche Teil der Veranstaltung ging über die Theorie zur Bastelei weit hinaus: Vorträge durch Münchner Professoren zeigten den Teilnehmern platonische Körper in Räumen mit vier Dimensionen oder exotischen Geometrien (Dierk Schleicher) und Ergebnisse etwa zur Winkelsumme im Tetraeder (Rudolf Fritsch).

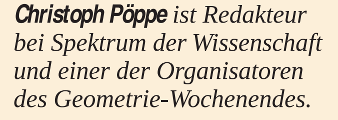
Das 1728-fache Ikosaeder wird vorläufig im Foyer des Mathematischen Instituts der Universität München zur Schau gestellt. Seinen endgültigen Platz wird es in dem Mathematikmuseum des Gießener Professors Albrecht Beutelspacher finden, dessen Planung ein konkretes Stadium erreicht hat: Seit Ende vergangenen Jahres verfügt es über ein Gebäude und eine Anschubfinanzierung. Beutelspacher hielt auch den krönenden Schlussvortrag des Wochenendes: „Mathematische Experimente“.

Weitere Einzelheiten und Bilder sind über die Website http://www.spektrum.de/geometriewochenende/ abzurufen. ■

HEINRICH STEINLEIN



Dierk Schleicher, Professor an der Universität München, demonstriert mit Plastikspielzeug, wie viele gleichseitige Dreiecke man höchstens um einen Punkt gruppieren kann – wenn man nicht die größere Freiheit hyperbolischer Räume nutzt, in denen die Winkelsumme im Dreieck stets kleiner ist als 180 Grad.



Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft und einer der Organisatoren des Geometrie-Wochenendes.



EUROPÄISCHE FRÜHGESCHICHTE

Das Labyrinth des Minos

Das antike Kreta ist eine der faszinierendsten Hochkulturen der Welt. Einen umfassenden Einblick in die Frühzeit dieser Insel bietet derzeit das Badische Landesmuseum Karlsruhe.

Von Matthias Mochner

Als der englische Archäologe Sir Arthur Evans im Jahre 1900 in Knossos südlich von Heraklion auf der Insel Kreta die umfangreichen Reste einer bronzezeitlichen Palastanlage entdeckte, stieß er in ein noch unerforschtes Kapitel der europäischen Geschichte vor. Der Legende nach hatte hier einst König Minos regiert, der mit seiner mächtigen Flotte das östliche Mittelmeer beherrschte. Zeus, sein göttlicher Vater, soll durch ihn der Menschheit die ersten Gesetze vermittelt haben.

Die minoische Kultur, wie sie Evans nach ihrem mythischen Ahnherren nannte, wird heute auf die Zeit zwischen 3000 und 1200 v. Chr. datiert. Sie gilt damit als die erste europäische Hochkultur überhaupt. Doch selbst hundert Jahre nach Beginn der Epoche machenden Ausgrabungen gleicht unsere Kenntnis darüber in vielem noch immer der Suche nach dem Weg aus dem Labyrinth des Minotaurus, der – hervorgegangen aus einer widernatürlichen Verbindung von Minos' Frau Pasiphae mit einem Stier – sein Unwesen auf dieser Insel getrieben haben soll. Viele der Fragen, die einst schon das Grabungsteam von Evans beschäftigten, können Spezialisten auch heute nicht abschließend beantworten.



ALLE ABBILDUNGEN: KATALOG

Diese Statuette einer Göttin mit Schlangen in den Händen ist etwa 3600 Jahre alt.

Wer waren die Minoer? Von woher kamen sie nach Kreta, dessen älteste Siedlungsspuren im Gebiet des von Evans erforschten Palastes sogar bis ins 7. Jahrtausend vor Christus zurückreichen? Welche Staatsform schuf sich dieses Volk, dessen politische Stellung im östlichen Mittelmeerraum vermutlich auf seine Vormachtstellung zur See begründet war? Was führte um 1900 v. Chr. zur unvermittelten Entstehung prächtiger Paläste in Knossos, Phaistos oder Mallia – Anlagen, die im Gegensatz zu zeitgleichen königlichen Bauten in anderen Kulturen keinen Befestigungscharakter aufweisen? Und was verursachte die Katastrophe, der um 1500 v. Chr. die minoischen Paläste – mit Ausnahme von Knossos, wo damals etwa 10000 bis 20000 Menschen wohnten – zum Opfer fielen? Auch ist die als Linear A bekannte minoische Schrift noch immer nicht entziffert. Aus diesen Symbolen ging die Linear-B-Schrift hervor, eine Frühform des Griechischen.

Am präzisesten sind gegenwärtig unsere Informationen zur Chronologie der minoischen Kultur. Anhand der Fülle an Keramikfunden konnten Generationen von Wissenschaftlern in mühsamer Kleinarbeit eine äußerst differenzierte Zeitfolge ermitteln. ▶

Die Doppelaxt war ein heiliges Symbol.

Living Reviews

Von Markus Pössel

Was liest der Astronom, der sich bislang mit Fragen der Sternentstehung beschäftigt hat, sich nun aber den Millisekunden-Pulsaren zuwenden möchte? Was die junge Physikerin, die sich in Vorbereitung ihrer Doktorarbeit mit Existenztheoremen für Lösungen der Einsteingleichungen auseinander setzen soll? Fachbücher zu so fortgeschrittenen und speziellen Themen sind rar.

Die Lösung: so genannte Review-Artikel, in denen Wissenschaftler zu begrenzten Themenbereichen ihres Fachgebiets den neuesten Forschungsstand aufzeigen, bisherige Ergebnisse zusammenfassen und einen Überblick über relevante Veröffentlichungen geben. Doch die Forschung schreitet fort, der Review-Artikel bleibt, einmal gedruckt, unverändert und gibt den aktuellen Wissensstand immer unvollständiger wieder – ärgerlich nicht nur für die Leser, sondern auch für den Autor, der hilflos zusehen muss, wie sein Werk mehr und mehr veraltet.

Abhilfe schaffen – zumindest für den Bereich der Relativitätstheorie – die „Living Reviews in Relativity". Die webbasierte elektronische Zeitschrift hat es sich zur Aufgabe gemacht, „lebende" Review-Artikel zu veröffentlichen, die von ihren Autoren betreut und fortlaufend aktualisiert werden. Seit der ersten Ausgabe 1998 sind zwanzig Artikel erschienen – mit einem Themenspektrum, das von der Mathematik partieller Differenzialgleichungen bis zur beobachtenden Astrophysik reicht. Die Idee zu dem Review-Journal der anderen Art stammt von Bernard Schutz, Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Golm bei Potsdam, das auch als Herausgeber der Zeitschrift fungiert.

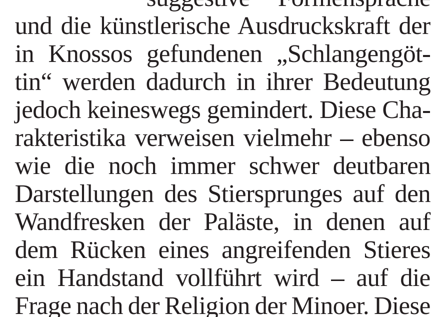
Ein Beispiel, von dem sich sicherlich auch Wissenschaftler anderer Disziplinen wünschen werden, dass es Schule macht. An den Machern der „Living Reviews" soll es nicht liegen: Sie haben vor, den Programmcode, der ihre Zeitschrift zum Laufen bringt, als Softwarepaket allgemein zugänglich zu machen.

Die „Living Reviews in Relativity" finden sich in elektronischer Form unter http://www.livingreviews.org



__Markus Pössel__ ist Physiker und promoviert zur Zeit am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Golm bei Potsdam.

Evans hatte sich seinerzeit noch damit begnügen müssen, die minoische Epoche in nur drei Phasen einzuteilen, die er Vorpalast-, Palast- und Spätpalastzeit nannte (siehe „Minoische Paläste“, Spektrum der Wissenschaft 9/1985, S. 106). Durch die Verbreitung der minoischen Keramik ließen sich aber auch ausgedehnte Handelskontakte der Kreter nachweisen – so mit dem griechischen Festland, mit Zypern, der Levante und sogar mit Ägypten. Jüngste Grabungen im Nildelta konnten beispielsweise zeigen, dass kretische Importgüter hier besonders geschätzt waren.



Tönerne Kanne mit Verzierung

Von der These einer Beeinflussung der minoischen Palastarchitektur durch die Bauten altorientalischer Städte – etwa den Palast der syrischen Stadt Mari – ist die Forschung inzwischen ebenso abgerückt wie davon, die offensichtlich unbefestigten Siedlungen auf Kreta als Ausdruck einer matriarchalischen Herrschaftsform mit einer großen Muttergottheit an der Spitze zu interpretieren. Die suggestive Formensprache und die künstlerische Ausdruckskraft der in Knossos gefundenen „Schlangengöttin“ werden dadurch in ihrer Bedeutung jedoch keineswegs gemindert. Diese Charakteristika verweisen vielmehr – ebenso wie die noch immer schwer deutbaren Darstellungen des Stiersprunges auf den Wandfresken der Paläste, in denen auf dem Rücken eines angreifenden Stieres ein Handstand vollführt wird – auf die Frage nach der Religion der Minoer. Diese war nach heutiger Auffassung tendenziell geschlechtsspezifisch: Männer wurden von Göttern, Frauen von Göttinnen beschützt. Ein allgemeines heiliges Symbol war die Doppelaxt (Bild Seite 97).

Aktuelle Forschungsergebnisse spiegeln sich auch in einem Modell des Palastes von Knossos, das eigens für die Sonderausstellung zur minoischen Kultur geschaffen wurde, die derzeit im Badischen Landesmuseum in Karlsruhe zu sehen ist. Dieses Modell präzisiert einerseits das Bild dieser bemerkenswerten Anlage, andererseits lässt es zentrale Fragen zur Architektur anschaulich werden. So ist beispielsweise noch ungeklärt, wie die weiten, zerbrechlichen Flachdächer des Palastes von Knossos die Wassermassen von Wolkenbrüchen bewältigten, die bis zu 300 Millimeter Niederschlag bringen konnten.

Demgegenüber sind sich die Wissenschaftler heute darin einig, dass zwischen den Palästen und den jeweiligen Siedlungen im Umland – einfachen Wohnhäusern, für die von der Forschung der Begriff der „minoischen Villa“ geprägt wurde – spezifische Wechselwirkungen bestanden, aus deren Untersuchung sich wichtige Hinweise auf die Struktur der minoischen Gesellschaft ergeben können. In diesem Zusammenhang ist auf



Der Palast von Knossos – hier im Modell – gruppierte sich um einen zentralen Hof. Die königlichen Gemächer erstreckten sich über mehrere Stockwerke und waren über ein großes Treppenhaus zugänglich.

NACHGEHAKT

Zeit der Wunder

BSE, das besonders schwere Erwachen

Etwas Gutes hat BSE: Wir lernen, uns wieder zu wundern. Dass tote Tiere der Aufzucht neuer Generationen von Schlachtvieh dienten – war das nicht verwunderlich (und auch ein wenig gruselig)? Dass Leberwurst aus deutschen Landen nicht nur frisch, sondern gelegentlich auch mit Hirn auf den Tisch kommt – Überraschung! Und dass dem Stück Filet ein Kettensägenmassaker in der Großschlachterei vorausgeht, bei dem Rückenmark nur so spratzt – wer hätte das gedacht?

Das Wunderbarste an allem aber ist unsere eigene Verwunderung. Nach all den kleinen und großen Umweltkatastrophen scheinen wir immer noch an das Gute im Menschen zu glauben, insbesondere daran, dass kleine und große Unternehmen von humanitären Erwägungen, nicht von den Bedingungen des Marktes getrieben werden. Und weil dem so ist, leben in unserer Vorstellung Abertausende von Rindern und anderem Vieh unter artgerechten Bedingungen, gesund ernährt und durch Bewegung an der frischen Luft vor Krankheiten geschützt. Sie sterben einen friedlichen Tod auf dem Schlachthof, werden dann fachärztlich begutachtet und anschließend liebevoll mit scharfem Stahl tranchiert, um letztlich keimfrei in den Auslagen zu landen.

Das Verwunderlichste aber ist, dass die, die es eigentlich wissen müssten, ebenfalls überrascht scheinen. Jeder Tierarzt, der seinen Dienst auf dem Schlachthof versieht, weiß, wie ein Metzger dort einen Leichnam halbiert. Doch Verwunderung scheint ansteckender als BSE. Und wenn ich den Gedanken so weiterspinne, dann staune ich noch über eines: Wie bei einem Reaktorunglück zu verfahren sei, ist tausendfach dokumentiert, doch Pläne für den Nahrungs-Gau – von dem wir nicht mehr so weit entfernt sind – gibt es wohl nicht. Zeit wird es.

Klaus-Dieter Linsmeier



Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.





Gefäßständer in Gebäudeform

das reiche archäologische Material minoischer Siegel zu verweisen: aus Ton geformte Plomben, mit denen Behältnisse oder Gefäße, aber auch Türen und Grabeingänge gesiegelt wurden. Diese tausendfach in den Palästen gefundenen Siegel bieten einen hervorragenden Einblick in die minoische Bilderwelt, und sie liefern Anhaltspunkte sowohl für die Entwicklung der Kunst der Minoer als auch für die Struktur ihrer Wirtschaft. Kretas Beziehungen zu anderen Kulturen des Mittelmeerraumes waren – dies belegen die in der Karlsruher Ausstellung vorgestellten Forschungsergebnisse – weit vielfältiger als bisher angenommen.

Kreta – und insbesondere der Mythos des Minotaurus – gab offenbar schon zu allen Zeiten den Menschen Rätsel auf. In der griechischen Antike wurde beispielsweise über die Etymologie des Namens der Insel nachgedacht, den der griechische Grammatiker Apollodoros von Athen im 2. Jahrhundert vor Christus kurioserweise von der „gut gemischten Luft um die Insel herum" herleitete. Der Philosoph Platon lokalisierte in seinem Werk „Gesetze" den Ursprung menschlicher Gesetzeswerke auf Kreta: Ihm zufolge wurde der wegen seiner Gerechtigkeit gerühmte König Rhadamanthys, ein Bruder des Minos, nach seinem Tode zum Richter in der Unterwelt bestellt. Und der christliche Apostel Paulus, der im Jahre 59 als Gefangener auf die Insel kam, polemisierte in einem Brief an den ersten Bischof von Kreta, Titus, über die Hartnäckigkeit, mit der die Kreter an ihrem Glauben festhielten.



Mosaik mit Stadtdarstellung

Handelskontakte mit den Ägyptern hat Thomas Mann in seinem Roman „Joseph und seine Brüder" mit der Schil- ▶



Der Thronsaal mit einem Thron aus skulptiertem Gips und Greifen-Fresken

derung von im minoischen Stil ausgemalten Bauten im Nildelta literarisch verewigt. Über den Handel dürfte auch die Kenntnis zu den Kretern gelangt sein, dass die ägyptischen Pharaonen als auf Erden weilende Götter galten. Möglicherweise spiegelt sich in der Legende, dass Zeus auf Kreta nicht nur geboren, sondern auch gestorben ist, noch eine schwache Reminiszenz an dieses Weltbild. Zeus jedenfalls ist neben König Minos, dessen Regierungszeit freilich unbekannt ist, die beherrschende mythische Figur auf der Insel. In der Gestalt eines Stieres, der auf Kreta kultische Verehrung genoss, soll er auf seinem Rücken Europe, die Tochter des phoinikischen Königs Agenor, nach Kreta entführt und sich dort mit ihr vermählt haben. In dieser Stierfigur überlagern sich verschiedene Bedeutungsebenen, die durch Erkenntnisse aus archäologischen Ausgrabungen bisher nur bedingt historisch fassbar wurden.

Denn die Beschäftigung mit der Kultur der Minoer führt letztlich immer wieder zum Mythos des Minotaurus zurück, dem alle neun Jahre je sieben Knaben und Mädchen geopfert werden mussten. Er wurde schließlich von Theseus in der Wohnstatt seines Labyrinth aufgespürt und erschlagen, wobei der Held nur mit Hilfe des Ariadne-Fadens in die Welt zurückfand. Dieser Mythos war auch in der gesamten römischen Welt weit verbreitet.

In Alt-Paphos auf Zypern ziert das Thema von Theseus und Ariadne als kreisrundes römisches Bodenmosaik die Baderäume einer luxuriösen Villa. Und in Pompeji findet sich an einer Hauswand ein Graffiti von Kinderhand: „Labyrinth! Hier wohnt der Minotauros!“ Auch in dem ehemals römisch besetzten Teil Kleinasiens sind Mosaike mit Motiven aus dem Minotaurus-Mythos zu finden (siehe „Der zweite Untergang von Zeugma“, Spektrum der Wissenschaft 12/2000, S. 96). Wie dieses Labyrinth wirklich aussah, ein Kreisrund oder ein Quadrat, darüber streitet die Forschung heute noch immer. Denn trotz der gewaltigen Ausmaße des Palastes von Knossos, der mehr als 17 000 Quadratmeter umfasste, spiegelt der Grundriss dieser Anlage nicht die Struktur eines Labyrinthes wider. ■

Matthias Mochner *arbeitet als freier Journalist und Museumsführer in Berlin.*

Die Ausstellung „Im Labyrinth des Minos. Kreta – die erste europäische Hochkultur“ ist bis zum 29. April 2001 im Badischen Landesmuseum Karlsruhe, Schloss, 76131 Karlsruhe, zu sehen. Geöffnet dienstags bis sonntags 10 – 18 Uhr.

AM RANDE

Sind wir uns grün?

Was uns der fluoreszierende Rhesusaffe bringt

Schritt für Schritt rückt die Gentechnik dem Menschen auf den Leib. Solange die Forscher nur die Gene von Fliegen so manipulieren, dass ihnen statt Fühlern am Kopf Fliegenbeine wachsen, empfinden wir die kleinen künstlichen Monster nicht als Bedrohung – obwohl das Erbgut der Fliege mit unserem mehr gemein hat, als unserem Gattungsstolz lieb sein kann.

Auch Labormäuse mit gentechnisch verändertem Erbgut gehören unterdessen zum Forschungsalltag. Doch erst wenn ein großes Säugetier wie das – nicht genmanipulierte – Klonschaf Dolly als künstliche Kopie im Stall steht, merkt die Öffentlichkeit erschrocken auf und fragt sich, wann jemand daran gehen wird, Menschen zu klonen.

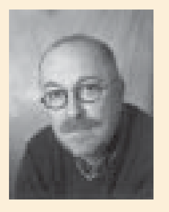
Kürzlich taten die Gentechniker einen weiteren kleinen Schritt auf den Menschen zu. An der Universität von Oregon brachte das Team um Gerald Schatten erstmals ein Rhesusäffchen mit künstlich verändertem Erbgut zur Welt. Es enthält ein ursprünglich aus einer Leuchtqualle stammendes Gen, das zuvor schon erfolgreich in das Genom von Pflanzen, Fröschen und Mäusen eingesetzt worden war. Zwar leuchtet das Äffchen ANDi (ein Anagramm aus ”inserted DNA”) zum Leidwesen seiner Schöpfer noch nicht im Dunkeln, aber immerhin fluoreszierten die Zehennägel und Haarwurzeln zweier tot geborener Schicksalsgenossen unter der UV-Lampe.

Natürlich behaupten die Forscher nicht, es sei wünschenswert, Primaten zu kreieren, die wie Tiefseewesen leuchten. Ihnen geht es um den Nachweis, dass man künftig für die medizinische Forschung nicht nur auf transgene Mäuse angewiesen sein wird, sondern auch auf Laboraffen als dem Menschen nahe artverwandte Versuchstiere zugreifen kann, um an ihnen die Gentherapie von Krankheiten wie Parkinson, Alzheimer oder Diabetes zu erproben.

Dennoch reizt das gespenstische Kunststück mit dem leuchtenden Affen die Fantasie zu allerlei Spekulationen: Wird es eines Tages gentechnisch möglich – und genethisch erlaubt – sein, auf elterlichen Wunsch ein Kind mit der Gabe der Fluoreszenz auszustatten, damit es nicht nur in der Disco Aufsehen erregt, sondern auch im nächtlichen Straßenverkehr besser auffällt?

Als Fernziel bietet sich sogar auf diesem Wege die endgültige Lösung des Welternährungsproblems an: Statt einem Affen das Fluoreszenz-Gen einer Qualle einzupflanzen, könnte man doch ebenso gut die Menschen durch Einsetzen von Pflanzengenen dazu bringen, im Körper Chlorophyll zu produzieren und als grüne Schicht unter der Haut dem Sonnenlicht zu präsentieren. Dann kämen sie in südlichen Gefilden mit ein paar Litern Wasser und einer Prise Spezialdünger über den Tag. In unseren Breiten hätten die Sonnenstudios Hochkonjunktur als menschliche Bioenergie-Tankstellen, während für Restaurants und Supermärkte schwere Zeiten anbrächen. Essen und Ernährung würden genauso entkoppelt wie derzeit schon Sex und Fortpflanzung.

Michael Springer



Der Autor ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.

EINLADUNG ZUM ABONNEMENT

Spektrum der Wissenschaft informiert monatlich über den aktuellen Stand von Naturwissenschaften, angewandter Forschung und Technologie. Auf hohem sachlichem Niveau, kompetent und authentisch – denn hier schreiben international renommierte Wissenschaftler selbst über ihre Arbeiten.

WIR MÖCHTEN AUCH IHRE FREUNDE FÜR UNS GEWINNEN

Als Abonnent von Spektrum der Wissenschaft können Sie aus eigener Erfahrung am besten beurteilen, wie wichtig es ist, kompetent, umfassend und authentisch informiert zu sein. Es wird Ihnen daher sicher nicht schwer fallen, unter Ihren Freunden und Bekannten einen neuen Spektrum-Abonnenten zu finden.

Als Dank für Ihre Empfehlung erhalten Sie wahlweise eine der abgebildeten Prämien.



MULTI-KLAPPWERKZEUG
Edelstahl mattsilber, mit 12 Bits



SWING kann ganz nach Geschmack – im doppelten Sinn – genutzt werden. Die eleganten Einzelteile aus poliertem Aluminium lassen sich individuell als Tischdekor drapieren. Zur geschmacklichen Abrundung stehen Pfeffer- und Salzstreuer zur Verfügung. Der 3. Spender dient als Süßstoff- oder Zahnstocherbehälter.

GESCHICHTE DER BIOLOGIE
Dieses Buch ist eine einzigartige Informationsquelle zur Biologie von der Antike über Altertum, Mittelalter und Neuzeit bis zu den modernen Arbeitsrichtungen der Gegenwart. Es berichtet von 35 000 Jahren alten Tierabbildungen auf Höhlenwänden bis hin zu den neuesten Methoden der Erbgutanalyse. Ein Standardwerk über die Geschichte der Biologie.

NUTZEN SIE DIE VORTEILE DES ABONNEMENTS:

Als Abonnent erhalten Sie Spektrum der Wissenschaft für monatlich DM 11,85; Schüler und Studenten ermäßigt für monatlich DM 10,30.

Als Dankeschön erhalten Sie das Postkartenbuch „Astro-Galerie“.

Das Online Archiv hält für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft alle zurückliegenden Ausgaben seit 1993 im Volltext bereit.

Außerdem haben Sie freien Zugang zu unserer Linkdatenbank mit über 11 000 ausgesuchten Quellen im Internet.





BEGINNEN SIE IHR ABONNEMENT MIT DER NÄCHSTEN AUSGABE UND SENDEN SIE NEBENSTEHENDE BESTELLKARTE AN UNS AB.

KINOFILM

Oliver Hirschbiegel (Regie)

Das Experiment

Nach dem Roman „Black Box“ von Mario Giordano. Mit Moritz Bleibtreu, Christian Berkel, Edgar Selge, Andrea Sawatzki, Maren Eggert und anderen. 120 Minuten, Kinostart am 15. März 2001

Im Sommer 1971 führte der Psychologe Philip Zimbaro von der Stanford-Universität (Kalifornien) ein Experiment durch, das wegen seines völlig unerwarteten Verlaufs als „Stanford-Experiment“ in die Psychologiegeschichte einging. Zimbaro hatte jungen, gesunden, psychisch unauffälligen Männern zum einen Teil die Rolle von Strafgefangenen, zum anderen Teil die der Aufseher in einem dafür hergerichteten „Gefängnis“ zugewiesen und wollte beobachten, in welcher Art diese künstlich hergestellte Situation ihr Verhalten beeinflusste. Bereits nach sieben Tagen musste er sein Experiment abbrechen, weil die Teilnehmer nicht mehr zwischen ihrer zugewiesenen Rolle und ihrer wahren Identität unterscheiden konnten (siehe www.prisonexp.org).



Professor Thon weist die „Wärter“ in ihre Rollen ein.

Der Film „Das Experiment“ verlegt diese Geschichte an den Rhein der Gegenwart. Per Zeitungsanzeige sucht das Psychologische Institut der Universität Köln zwanzig gesunde, nicht kriminelle oder drogenabhängige Männer, die bereit sind, für 4000 DM an einem 14-tägigen Experiment teilzunehmen. Die Kandidaten, die sich melden, werden mit zahlreichen Tests sorgfältig ausgelesen, damit nur gutartige, gesunde Menschen in dieser Extremsituation zusammengeführt werden.

Der Held der Story, Tarek Fahd (Moritz Bleibtreu), arbeitet augenblicklich als Taxifahrer und bewirbt sich, um mit einer Undercover-Story aus dem Versuchsknast sein Comeback als Journalist zu betreiben. Auf seiner letzten Taxifahrt trifft er – eine Romanze darf natürlich nicht fehlen – die schöne Dora (Maren Eggert) und verbringt mit ihr seine letzte Nacht vor dem Experiment.

Am Morgen des Experiments werden die 20 Teilnehmer per Zufall auf die Gruppe der Wärter und die der Strafgefangenen aufgeteilt und entsprechend ihrer Rolle eingekleidet. Die Aufseher bekommen Uniformen, die Häftlinge lediglich weiße Hängerchen ohne Unterwäsche mit ihrer Nummer. Während die Häftlinge zahlreiche Regeln zu befolgen haben, ist den Strafvollzugsbeamten lediglich untersagt, den Gefangenen Gewalt anzutun.

Bereits bei der Einkleidung beginnt die Entwürdigungszeremonie: Die Wärter reinigen die Gefangenen mit einem Gartenschlauch und machen sich über sie lustig. Strafvollzugsbeamte wie Insassen ziehen dennoch in einer ausgelassenen, partygleichen Stimmung in den videoüberwachten Zellentrakt des improvisierten Versuchsknasts ein. Big Brother lässt grüßen.

Professor Thon (Edgar Selge), seine Assistentin Dr. Jutta Grimme (Andrea Sawatzki) und eine studentische Hilfskraft überwachen und analysieren das Geschehen in ihrem Menschenzoo. Bereits nach zwölf Stunden verwandeln sich einige Wärter in autoritäre Tyrannen. Sie bestrafen die Häftlinge für die Nichteinhaltung von Regeln und quälen sie, um ihre eigene soziale Dominanz zu bestätigen. Tarek untergräbt mit seiner unkonventionellen Art immer wieder die Autorität der Aufseher, die zunächst ihn, dann auch alle anderen Insassen tyrannisieren. Er widersetzt sich der Geltungssucht der Strafvollzugsbeamten und unterstützt die Schwächeren, wie beispielsweise Schütte (Oliver Stokowski), der trotz Milchallergie gezwungen wird, seine Mahlzeit vollständig aufzuessen. Den Gefangenen setzen die extremen psychischen Belastungen durch die Beschneidung ihrer bürgerlichen Rechte zu. Psychosen und Autoaggressionen sind an der Tagesordnung.



Psychischer Ausnahmezustand durch Demütigung

Am fünften Tag entwickelt der Versuch eine nicht vorhersehbare Eigendynamik und wird zu einem Kampf auf Leben und Tod. Zwei profilneurotische Aufseher kidnappen die beobachtenden Wissenschaftler, degradieren sie zu Insassen des Versuchskäfigs und machen sie so zu einem Teil ihres eigenen Experiments. Der Held landet in einer licht- und schalltoten Blackbox, die eigentlich nur zur Abschreckung in dem improvisierten Gefängnis aufgestellt war. Trotz seiner Angst vor engen Räumen behält er die Ruhe, findet – höchst unwahrscheinlich – einen Schraubenzieher in der höchstens zwei Kubikmeter großen Zelle, kann sich aus ihr befreien und bewahrt die in das Experiment einbezogene Assistentin vor einer Vergewaltigung. Ihm und dem Major Steinhoff (Christian Berkel), der von der Bundeswehr als Spion eingeschleust wurde, gelingt dann ein spektakulärer Ausbruch.



Die „Gefängniswärter“ machen die Assistentin des Versuchsleiters zur Mitgefangenen.



Dora hat sich völlig ungeplant in Tarek verliebt.

Dieser Psychothriller verdeutlicht, dass nahezu jeder durch Veränderung seines sozialen Umfelds zur extremen Unmenschlichkeit oder zur totalen Unterwerfung und Deindividualisierung gebracht werden kann. Sanfte Männer werden zu Mördern ihrer Peiniger, unterdrückte Seelen missbrauchen die ihnen verliehene Macht. Nur Tarek bleibt, wie er ist, und wird erst dadurch zum eigentlichen Helden. Die Experimentatoren handeln steif und profillos, missachten in merkwürdiger Betriebsblindheit ethische Grundsätze und ignorieren die offensichtlichen Hilfeschreie der Insassen, statt zu intervenieren oder den Versuch vorzeitig zu beenden.

Es wirkt alles sehr fantastisch; aber wahrscheinlich ist dieser Film realitätsnäher, als es den Anschein hat. Neben dem Stanford-Experiment ist das Milgram-Experiment ebenfalls berühmt geworden: Nur durch die wissenschaftliche Autorität des Versuchsleiters veranlasst zeigten gewöhnliche Menschen sich bereit, ihresgleichen zu töten. Aus diesen Experimenten wissen wir, dass es bei den meisten Menschen nur eines relativ geringen Anstoßes bedarf, damit sie jegliche Mitleidsfähigkeit verlieren und blinden Gehorsam üben, statt sich zu widersetzen.

Neben dieser beklemmenden Botschaft verblassen einige unglaubwürdige Details. In der Realität hätte Dora ihrem One-night-stand mit Sicherheit nicht so hartnäckig und verzweifelt hinterhertelefoniert und auch noch seine Wohnung durchwühlt, wie sie das in dem Film der Spannung zuliebe tut.

Und der Film ist wirklich ungeheuer packend! Ich habe mich mit Jutta Grimme identifiziert und sehr darüber erregt, dass sie sich nicht über ihren Chef hinwegsetzt und das Experiment rechtzeitig abbricht. Hinterher habe ich noch eine ganze Weile gezittert.

Kirsten Kruck

Die Rezensentin ist Diplom-Biologin und Informatikerin; sie war an sozialpsychologischen Experimenten des Typs „Fremder trifft Fremde“ beteiligt und arbeitet jetzt am Humanethologischen Filmarchiv der Max-Planck-Gesellschaft in Andechs.

KOGNITIONSFORSCHUNG

Donald D. Hoffman

Visuelle Intelligenz

Wie die Welt im Kopf entsteht

Aus dem Amerikanischen von Hainer Kober.
Klett-Cotta, Stuttgart 2000. 331 Seiten, DM 48,–

Dieses Buch gehört zum Besten, was zum Thema Kognition, Bewusstsein und Realität in den letzten Jahren in deutscher Sprache erschienen ist. Donald D. Hoffman, Professor für Kognitionswissenschaft, Philosophie und Computerwissenschaft an der Universität von Kalifornien in Irvine, hat eine beeindruckende Arbeit abgeliefert; schon die 32 Seiten Literaturverzeichnis zeugen von ungeheurem Fleiß. Gleichwohl kommt der Haupttext flott und dennoch präzise formuliert daher. Es macht Spaß, mit Hoffman gemeinsam zu entdecken, „wie unsere Welt im Kopf entsteht".

Das Hauptthema des Buches ist unser visuelles System, also der Teil unseres Gehirns, der uns „Augentieren" den Großteil unseres Welterlebens vermittelt: mühelos, unbewusst und in Bruchteilen von Sekunden, sobald wir die Augen öffnen. Und genau darum sind uns die komplizierten Prozesse, die sich dabei in unserem Gehirn abspielen, weitgehend unbekannt.

Folgerichtig überrascht uns der Autor zunächst mit allerlei visuellen Merkwürdigkeiten, die alle nur ein Ziel haben: uns davon zu überzeugen, dass „Sehen" nicht im Geringsten der selbstverständliche Vorgang ist, für den man es im Allgemeinen hält.

Dabei zieht Hoffman alle Register der Psychophysik: Er konfrontiert den Leser mit Würfeln, die keine sind, mit Quadraten und Dreiecken, die zwar zu sehen sind, aber nie gedruckt wurden, und mit Farbflächen, die einmal braun, ein andermal rot erscheinen – abhängig vom Kontext. Alles dies lässt nur einen einzigen Schluss zu: Die Welt ist nicht so, wie sie unseren Augen erscheint.

Offensichtlich genügen schon schwache Andeutungen, um bestimmte und manchmal halt auch falsche Perzepte zu erzeugen. Der Grund ist einfach: Je früher ein Individuum erste Hinweise etwa auf ein potenziell gefährliches Raubtier erkennt, desto größer ist seine Überlebenschance. Es macht also durchaus Sinn, selbst kleinste Hinweise interpretierend ernst zu nehmen.

Nun liefern aber die vagen Helligkeitsschwankungen, die von unseren Augenlinsen auf die Netzhäute projiziert werden, kaum genügend Anhaltspunkte zur direkten Analyse. Erst mit Hilfe extrem mächtiger Heuristiken kommt eine blitzschnell arbeitende Maschine, eben unser visuelles System, zu brauchbaren Schlüssen. In diesem Sinne konstruiert unser visuelles System die Welt, die wir sehen.

Gerade weil Erlebtes nicht nur von den Eingangsdaten abhängt, sondern interpretiert wird, sind Täuschungen möglich; diese lehren uns letztlich nur, wie vage die optischen Eingangsdaten sind. Auch bei allen anderen Sinnen – etwa beim Hören und beim Tastsinn – unterliegen wir ähnlichen Täuschungen. Und all dies lässt nur einen einzigen, recht radikalen Schluss zu: Die Welt, wie wir sie erleben, ist konstruiert; sie existiert nur in unserem Kopf, erzeugt von einer gewaltigen Inferenz- (Schlussfolgerungs-)Maschine, unserem Gehirn.

Im Verlauf des Buches lernt der Leser insgesamt 34 Regeln kennen, die unser visuelles System – manchmal konkurrierend – einsetzt, um aus dem Netzhautbild Sinn zu machen. So kommen wir praktisch nie auf die Idee, dass eine gerade Linie in einer Zeichnung Abbild einer im Dreidimensionalen gekrümmten Linie sein könnte. Darauf beruhen einige der „unmöglichen" Gebilde, die der niederländische Maler und Grafiker Maurits C. Escher so vortrefflich entworfen hat. Man kann diese unmöglich erscheinenden Gegenstände sogar nachbauen. Es genügt, einige der geraden Linien unter Erhaltung der Blickrichtung etwas zu verbiegen. Aber: Das funktioniert natürlich nur mit einer einzigen, festen Blickrichtung. Eine winzige Kopfbewegung des Betrachters verrät den Trick, und hier versteckt sich das tiefere Geheimnis hinter dieser Regel. Unser geistiges Auge akzeptiert nur Interpretationen, die stabil gegenüber zufälligen Variationen sind.

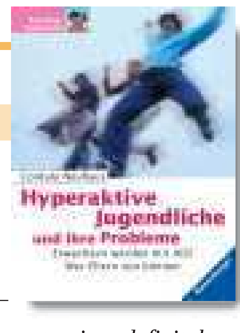
Allerdings: Die 34 Regeln, die uns der Autor verrät, und einige weitere sind nur Ansatz eines Verständnisses; wie genau das visuelle System zu seiner Konstruktion der Welt kommt, ist noch größtenteils unbekannt und Gegenstand aktueller, spannender Forschung.

Wer immer sich mit dem Thema „Wahrnehmung" beschäftigt, stößt unweigerlich auf die Frage des Zusammenhangs zwischen Gesehenem und Konstruiertem und damit nach dem Wesen des Bewusstseins. Auch Hoffman nimmt sich im letzten Kapitel seines Buches dieser Frage an – vorsichtig und geschickterweise, ohne sich richtig festzulegen. Bislang seien alle drei Grundkonzepte des Verhältnisses zwischen „Welt" und Erlebtem mit den gegenwärtigen Erkenntnissen der Naturwissenschaft verträglich: der Physikalismus, in dem alles Wirkliche physischer Natur ist, der Dualismus, in dem es eine Unterscheidung zwischen bewussten und unbewussten Dingen gibt, und der Idealismus, in dem schließlich alles beseelt ist. Darüber kann man vortrefflich streiten, und nach der Lektüre dieses Buches hat man reichlich Stoff dafür.

Rolf D. Henkel

„In jeder Hälfte dieser Zeichnung konstruieren Sie eine Fläche, die eben ist, geisterhaft blau und klar umrissene Grenzen besitzt. Wenn Sie sie zu einem Stereobild verschmelzen, erblicken Sie abermals eine geisterhaft blaue Fläche mit scharf umrissenen Grenzen, doch jetzt krümmt sie sich ein gutes Stück vor den schwarzen Kreisen … Eine eindrucksvolle Konstruktion. Sie müssen zugeben, dass Sie ein ausgezeichneter Konstrukteur sind."

Der Rezensent ist promovierter Physiker; er arbeitet am Institut für Theoretische Neurophysik und am Zentrum für Kognitionswissenschaften der Universität Bremen.



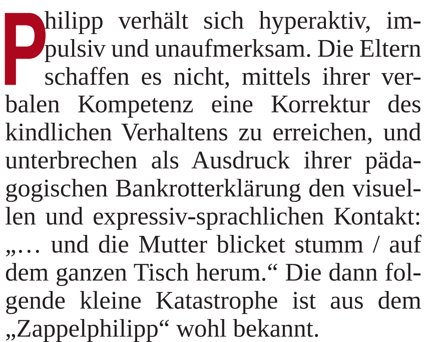
PSYCHIATRIE

Cordula Neuhaus

Hyperaktive Jugendliche und ihre Probleme

Erwachsen werden mit ADS. Was Eltern tun können

Urania Ravensburger, Berlin 2000. 288 Seiten, DM 29,90



Philipp verhält sich hyperaktiv, impulsiv und unaufmerksam. Die Eltern schaffen es nicht, mittels ihrer verbalen Kompetenz eine Korrektur des kindlichen Verhaltens zu erreichen, und unterbrechen als Ausdruck ihrer pädagogischen Bankrotterklärung den visuellen und expressiv-sprachlichen Kontakt: „… und die Mutter blicket stumm / auf dem ganzen Tisch herum.“ Die dann folgende kleine Katastrophe ist aus dem „Zappelphilipp“ wohl bekannt.

Das Problem hat inzwischen einen offiziellen Namen samt Nummer in dem amerikanischen Krankheitenkatalog DSM-IV und dem auch in Deutschland geltenden ICD-10: *attention deficit hyperactivity disorder/syndrome* (ADHD bzw. ADHS). Es betrifft etwa 3 bis 5 Prozent der heutigen Schulkinder. Eine gesicherte Erklärung gibt es bis heute nicht, wohl aber zahlreiche neurobiologische und -psychologische Hypothesen (Spektrum der Wissenschaft 3/1999, S. 30).

Auf ihren 1996 verfassten Ratgeber „Das hyperaktive Kind und seine Probleme“ lässt Cordula Neuhaus, Heilpädagogin und verhaltenstherapeutisch ausgewiesene Psychologin, ein entsprechendes Werk über Jugendliche und junge Erwachsene folgen, das „als unersetzliche Hilfe für die betroffenen Jugendlichen, deren Eltern, Erzieher sowie alle Therapeuten“ verstanden werden will.

Das Buch ist ein Mosaik aus Erfahrungsberichten von Jugendlichen und deren Eltern, Statements der Autorin, Zitaten aus der wissenschaftlichen Literatur, therapeutischen Anweisungen und Plänen sowie Merksätzen in Form von Zusammenfassungen und Randkommentaren. Die dort genannten symptomorientierten Interventionen erscheinen durchaus sinnvoll, will man sich auf verhaltenstherapeutisches Vorgehen festlegen.

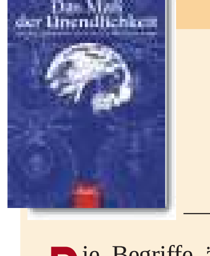
Insgesamt leidet das Buch jedoch unter schweren grundsätzlichen Mängeln. Cordula Neuhaus versucht, nahezu die Gesamtheit der bei Jugendlichen bekannten psychischen Auffälligkeiten und Störungsbilder als Folge einer seit dem frühen Kindesalter fortbestehenden ADHD-Problematik zu interpretieren. Dazu dehnt sie die Gültigkeit der 18 spezifisch für das Grundschulalter definierten diagnostischen Kriterien von DSM-IV und ICD-10 auch auf Jugendliche und junge Erwachsene aus und fügt ihnen weitere 38 Kriterien hinzu, die durch nichts als ihre eigene Erfahrung begründet sind. Damit konstruiert sie ein wissenschaftlich nicht gesichertes und aus psychotherapeutischer Sicht bedenkliches Kontinuum: „Einmal ADHS, immer ADHS.“

Ein derart generalisierendes Postulat kann die ohnehin irritierten jugendlichen Persönlichkeiten, denen ihre sozialen Beziehungen nur erschwert gelingen, allenfalls zusätzlich verunsichern. Und wenn es denn zuträfe: Ist das Phänomen dann überhaupt therapeutisch beeinflussbar? Und ist die diagnostische Kategorie ADHD zu irgendetwas nütze?

Neurobiologische Forschungsbemühungen und -ergebnisse werden genannt und als bewiesene Fakten dargestellt, obwohl bisher kein einziger biologischer Befund als Marker für ADHD gelten kann. Der Leser muss zu dem Schluss kommen, dass Jugendliche mit ADHD-Problemen mit einem spezifisch beschädigten Gehirn leben, wodurch die Behauptung „einmal ADHS, immer ADHS“ eine Pseudo-Begründung erfährt.

Unberücksichtigt bleibt auch, dass Defizite der exekutiven Funktionen Arbeitsgedächtnis, affektive Selbstregulation, Motivation, Wachheit, Selbstkontrolle und zielgerichtetes Verhalten keineswegs spezifisch für ADHD sind.

Im Abschnitt „Die Abgrenzung von anderen Störungsbildern“ nennt die Autorin verschiedene jugendtypische Störungen und gibt – verhalten, aber durchgängig – der Vermutung Raum, diese könnten auf eine bereits früher bestehende ADHD-Problematik zurückgehen.



KOSMOLOGIE

Kitty Ferguson

Das Maß der Unendlichkeit

Auf der Suche nach den Grenzen des Universums

Aus dem Englischen von Friedrich Griese.
Econ, München 2000. 335 Seiten, DM 39,90

Die Begriffe ändern sich, die Faszination bleibt. Glaubten die Menschen vergangener Jahrhunderte noch, durch die „Löcher im Firmament“ Funken aus der Götterwelt zu erhaschen, so fesselt uns Heutige die kosmische Zauberwelt der Schwarzen Löcher, Weißen Zwerge, Roten Riesen und Wurmlöcher gleichermaßen. Empirische Entfernungsbestimmungen und theoretische Modelle eröffnen uns den Zugang zum Universum, ohne dass wir uns auch nur einen Kilometer von der Erde zu entfernen bräuchten – von Lichtjahren oder Megaparsec ganz zu schweigen.



Der um 1840 errichtete „Leviathan von Parsontown“ blieb über fünfzig Jahre das größte Teleskop der Welt.

Nicht weniger faszinierend als der „Blick nach draußen“ selbst ist die Geschichte unserer Versuche, die Tiefen des Weltalls auszuloten. Kitty Ferguson, bekannt durch ihre Biografie über Stephen Hawking, präsentiert nun eine Gesamtdarstellung, von den ersten Erde-Sonne-Entfernungsbestimmungen der Antike bis hin zur aktuellen Frage nach der Materiedichte des Universums. Ihr Buch ist erfreulich gut lesbar und veranschaulicht clever die – nicht immer einfachen – Prinzipien bestimmter Messtechniken sowie die zugehörigen Theorien. Kapitel über die großen „Helden“ – vor allem die über Kopernikus, Kepler, Galilei und Newton – lassen Wissenschaftsgeschichte lebendig werden.

Erfreulich auch Fergusons kritische Gedanken zum Thema Wissenschaftsgläubigkeit. Der Blick auf die Geschichte lehrt nämlich, nicht alles als endgültige Wahrheit anzunehmen, was gegenwärtig Stand der Dinge ist.

Eine in vielerlei Hinsicht lohnende Lektüre.

Carsten Könneker

Dabei gibt es noch nicht einmal Kategorien, die eine solche Vermutung zu präzisieren erlauben würden – wie unterscheidet man ADHD von sehr ähnlichen Verhaltensauffälligkeiten im Gefolge psychischer Erkrankungen? –, geschweige denn einen handfesten Nachweis.

Für eine differenzielle Therapieplanung nach zutreffender Diagnose sind organische Krankheiten, Funktions- und Entwicklungsstörungen sowie die Familiendynamik abzuwägen. Es reicht keineswegs aus zu wissen, was ADHD ist.

Niemand würde heute noch die pädagogischen Vorstellungen des „Zappelphilipp"-Autors Heinrich Hoffmann vertreten. Aber eines hat er richtig gesehen: Es kommt darauf an, die Familie einzubeziehen. Wenn das Buch von Neuhaus Betroffene motivieren würde, sich an einen Experten zu wenden, der auch etwas von Familientherapie und -dynamik versteht, hätte es zumindest keinen großen Schaden angerichtet.

Helmut Bonney

Der Rezensent ist Arzt für Kinder- und Jugendpsychiatrie und für Kinderheilkunde und arbeitet als systemischer Familientherapeut in Heidelberg.

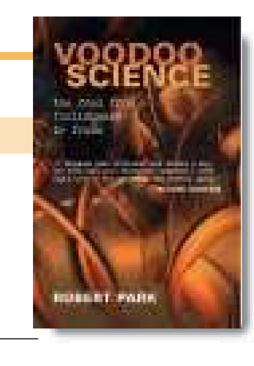
PSEUDOWISSENSCHAFT

Robert L. Park

Voodoo Science

The Road from Foolishness to Fraud

Oxford University Press, Oxford / New York 2000. 230 Seiten, $ 25,–



Obwohl das Buch von einem Amerikaner für Amerikaner geschrieben wurde, betrifft es uns auch. Es handelt von der zunehmenden Ununterscheidbarkeit von Wissenschaft und Hokuspokus, der sich den Mantel der Wissenschaft umgehängt hat, nicht nur für ganz gewöhnliche Leute, sondern auch für Regierungen und Industrie, ja sogar für die Wissenschaftler selbst. Der Autor, Physikprofessor und Leiter des Washingtoner Büros der American Physical Society, äußert sich seit Jahren einmal die Woche in einer Internet-Kolumne namens „What's New" zu aktuellen Themen der Wissenschaftspolitik (http://www.aps.org/WN/), mit stets demselben sorgfältig formulierten Satz im „Kleingedruckten": „Opinions are the author's and are not necessarily shared by the American Physical Society, but they should be."

Unter dem Oberbegriff Voodoo – der im Englischen nicht nur für den Zauberkult Wodu, sondern für Zauberei und Hexerei aller Art steht – fasst Park alles zusammen, was ihm nicht als seriöse Wissenschaft gilt. Er unterscheidet fünf Spielarten von Voodoo-Wissenschaft.

Erstens die pathologische Wissenschaft. Sie fängt damit an, dass ein Wissenschaftler sich durch die Hoffnung auf Ruhm und/oder Geld dazu verleiten lässt, seine Ergebnisse zu überschätzen. Statt sie den üblichen Prozeduren auszusetzen, über die öffentliche Kontrolle durch die Wissenschaftlergemeinde zur Publikation in einer wissenschaftlichen Zeitschrift und danach, eventuell, zu Schlagzeilen, Ruhm und Geld, zäumt er das Pferd vom Schwanz her auf: zuerst die Pressekonferenz, in der die Bedeutung der Entdeckung betont wird, dann – wenn über- ▶

haupt – die Bekanntgabe von überprüfbaren Details. So war es 1989, als die Chemiker Stanley Pons und Martin Fleischmann, damals an der Universität von Utah in Salt Lake City, die „Kalte Fusion“ entdeckt zu haben glaubten, einen nach allem physikalischen Verständnis unmöglichen Prozess, durch den beliebig viel „saubere“ Energie zu gewinnen wäre. Bald wurde wissenschaftlich erwiesen, dass der vermeintliche Prozess tatsächlich nicht auftritt. Seine Proponenten hätten ihre Behauptungen als ehrlichen Irrtum zurückziehen müssen – und das vielleicht auch getan, wäre es noch in der Stille der Wissenschaft möglich gewesen. Aber eben das ging nun nicht mehr. Pons und Fleischmann waren „Weltberühmtheiten geworden und standen nun vor ihrer Entwürdigung im Angesicht der ganzen Welt. Was als durch Wunschdenken bestimmte Interpretation eines schlampigen und unvollständigen Experimentes begonnen hatte, war zur bewussten Verdunkelung und Unterdrückung von Daten geworden. Hiermit … hatte die Kalte Fusion ganz klar die Linie überschritten, die Torheit von Betrug trennt.“

Mit dieser Einschätzung ist Park bei der zweiten Spielart von Voodoo-Wissenschaft angekommen – der betrügerischen Wissenschaft. Die dritte ist Pseudowissenschaft: Ein Erfinder präsentiert in gutem Glauben dem Publikum eine Maschine, die mehr Energie liefern soll, als sie verbraucht, und damit beiden Hauptsätzen der Thermodynamik widerspräche. Oder es wird dem Glauben Vorschub geleistet, die Erde werde von Außerirdischen besucht, die mit Überlichtgeschwindigkeit reisen. „Die Akteure der Pseudowissenschaft halten ihr Tun möglicherweise wirklich für Wissenschaft – genauso wie Zauberer und Gurus glauben mögen, sie besäßen übernatürliche Kräfte.“ Beide aber, pathologische und Pseudowissenschaft, haben eine Tendenz zum Übergang in die betrügerische Wissenschaft: „Was als ehrlicher Irrtum beginnt, kann sich durch kleinste Schritte vom Selbstbetrug zum Betrug entwickeln.“

Dann – viertens – die Wissenschaft für den Papierkorb. Ihre Unterstellungen können zwar zutreffen, aber es gibt nichts, was wirklich für sie spricht. Als Beispiele führt Park die unterstellte Krebs erzeugende Wirkung von Starkstromleitungen und – in einem Fall – von polychlorierten Biphenylen (PCB) an. Mir scheint, dass in derartigen Fällen mehr Misstrauen am Platz ist, als Park anerkennt. Dass die Öffentlichkeit aber auch unsinnigen Unterstellungen von Risiken ausgesetzt wird, ist unbestreitbar.

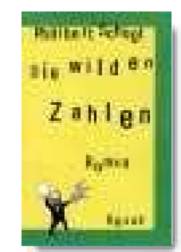
Vom ehrlichen Irrtum geht es mit kleinsten Schritten zum Betrug

Schließlich und fünftens die unwichtige Wissenschaft. Sie nimmt zwar immense Fördermittel in Anspruch, kann aber keine Ergebnisse liefern, die auch nur im Entferntesten den Aufwand rechtfertigen würden. Als Beispiele nennt Park erstens die bemannte Raumfahrt und zweitens SDI, vulgo Starwars, den unter Präsident Reagan geplanten Schutzwall gegen interkontinentale Trägerraketen von Atomwaffen, dessen Entwicklung später aufgegeben wurde, nun aber wiederbelebt werden soll – ein dankbares Thema für Parks Internet-Kolumnen. Zur bemannten Raumfahrt, verglichen mit der unbemannten und deren wissenschaftlichen Erträgen, bemerkt Park süffisant: „Während die unbemannte Raumsonde *Mariner 2* den Planeten Venus in 160 Millionen Kilometer Entfernung besucht hat, ist der Astronaut John Glenn von der Erde niemals weiter weg gewesen, als Baltimore von New York entfernt ist“.

An dem Buch beglückt der klare Verstand, mit dem sich Park gegen alle Arten von Voodoo wendet. Das Buch ist auch ein psychologisches Meisterwerk. Allerdings kann ich Park auf den letzten 10 bis 20 seiner insgesamt gut 210 Textseiten nicht beipflichten, wenn er auch den unleugbaren Wundern der Quantenmechanik wie der Teleportation und den – in Einsteins Worten – „spukhaften Fernwirkungen“ mit derselben Skepsis begegnet wie zuvor dem echten Voodoo. Ratlos gelassen hat mich auch Parks mir völlig neue Interpretation der Unschärferelation, und auf den letzten Seiten des Buches nimmt die Klarheit ab. Aber das ist belanglos bei 190 Seiten präziser und unterhaltsamer Darstellung des misslichen Erfolges von Voodoo-Wissenschaft und dessen, was dagegen getan werden kann und muss.

Henning Genz

Der Rezensent ist Professor für Physik mit dem Arbeitsgebiet Theorie der Elementarteilchen am Institut für Theoretische Teilchenphysik der Universität Karlsruhe.



ROMAN

Philibert Schogt

Die wilden Zahlen

Aus dem Niederländischen von Thomas Hauth.
Albrecht Knaus, München 2000. 224 Seiten, DM 36,–

Isaac Swift ist Juniorprofessor an einer amerikanischen Universität und dazu ein Wissenschaftler, wie man ihn häufig finden kann. Ständig zweifelt er, ob seine Leidenschaft, die reine Mathematik, nicht doch nur brotlose Kunst ist, wie es die selbstherrlichen Mediziner auf ihren schicken Stehpartys immer behaupten. Im Dauerkonflikt mit der gefühlsgeschüttelten Weltsicht des anderen Geschlechts – so stellt es jedenfalls der Roman dar – fristet er ein unspektakuläres Dasein. Von der Mathematik ist Isaac seit seiner Kindheit fasziniert – oder besser: besessen. Mal ist sie ihm köstliche Droge, mal Schmerzmittel, ein Fluchtweg aus dem Chaos der Gefühle.

Eingespannt von der akademischen Lehre und den Notwendigkeiten des Junggesellenlebens, plätschert Isaacs Leben so vor sich hin. Doch dann ändert sich auf einmal alles. Isaac erlebt das „Wunder der mathematischen Offenbarung“: Beinahe zufällig löst er eines der ganz großen Rätsel seiner Zunft, das Problem der so genannten „wilden Zahlen“, an dem sich Generationen mathematischer Genies zuvor vergeblich versucht hatten. Der Held schwebt im siebten Himmel: Die Geschichtsbücher werden von ihm, Isaac Swift, berichten.

Es könnte alles so schön sein – wenn da nicht Leonard Vale wäre, ein geistig leicht angeschlagener ehemaliger Lehrer, der seit geraumer Zeit als Gasthörer das Institut tyrannisiert und felsenfest davon überzeugt ist, die Vorlage für Isaacs Geniestreich geliefert zu haben. Ein spannendes Ringen um die mathematische Wahrheit beginnt, erfrischend nüchtern und dabei stets amüsant geschrieben.

Philibert Schogt kann man zu diesem großartigen Debüt nur gratulieren. Sein Roman gibt allen Theoretikern etwas zu schmunzeln über ihr Leben in unserer eben doch nur teilweise exakten Welt; für jeden wissenschaftlich interessierten Leser ist er einfach ein großer Spaß!

Carsten Könneker

Lindwürmer

von Pierre Tougne

Siggis Zimmerlinde hat Würmer. Lindwürmer. Diese heimtückischen Biester haben viele Köpfe auf langen Hälsen, viele Schwänze, magische Eigenschaften und unstillbaren Appetit. Ein Lindwurm ist in seinem Fresswahn erst gestoppt, wenn alle Schwänze und Hälse verknotet sind.

Der tapfere Siggi kann entweder zwei Hälse zusammenknoten oder einen Hals einzeln verknoten, gleiches gilt für die Schwänze.

- ➤ Verknotet er einen einzelnen Hals, so wächst sofort ein neuer nach.
- ➤ Verknotet er zwei Hälse miteinander, so geschieht nichts dergleichen.
- ➤ Verknotet er zwei Schwänze miteinander, so wächst ein Hals nach.
- ➤ Verknotet er einen einzelnen Schwanz, so wachsen sofort zwei neue Schwänze nach.

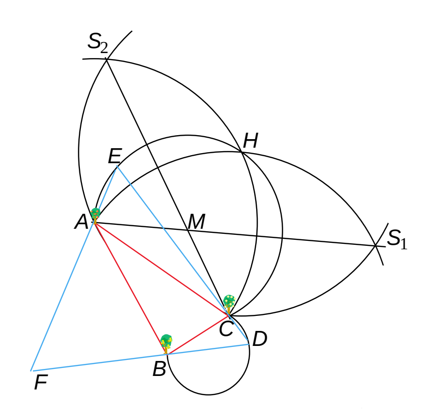
Wie viele Knoten muss Siggi machen, um einen Lindwurm mit *h* Hälsen und *s* Schwänzen zu bändigen?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Spiele „Drei gewinnt“. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 13. März 2001, eingehen.

Lösung zu „Jannis’ Weide“ (Januar 2001)

Jannis beginnt mit der Konstruktion der gleichseitigen dreieckigen Weide. Unter vielen möglichen Lösungswegen wählt er die Konstruktion von Heinrich Biener aus Weilheim:



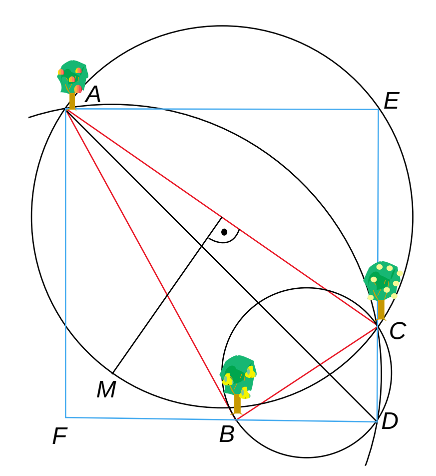
Zuerst errichtet er über der Strecke $\overline{AC}$ ein gleichseitiges Dreieck. Er zieht dazu mit Pflock und Seil zwei Kreise mit Radius $\overline{AC}$ um *A* und um *C*. Deren Schnittpunkt bezeichnet er mit *H*. Zu dem gleichseitigen Dreieck *ACH* konstruiert er den Umkreismittelpunkt *M* als Schnittpunkt zweier Mittelsenkrechten. Da Furchenziehen mühsam ist, bemüht er sich, die schon gezogenen Kreise wiederzuverwenden. Er zieht eine Furche um *H* mit demselben Radius wie zuvor, schlägt an deren Schnittpunkten S_1 und S_2 mit den bisherigen Kreisen Pflöcke ein und spannt Schnüre von S_1 nach *A* und von S_2 nach *C*. Deren Kreuzungspunkt ist *M*.

Der Umkreis des Dreiecks *ACH* ist ein „Fasskreis“, das heißt, er ist der Umkreis aller Dreiecke, die $\overline{AC}$ als Seite und einen gegenüberliegenden Winkel von 60° haben, wie das Dreieck *ACE* mit beliebig wählbarem Punkt *E*. Jannis führt nun die gesamte Konstruktion nochmals über $\overline{BC}$ statt $\overline{AC}$ aus und erhält dort ebenso einen Fasskreis.

Für eine beliebige Gerade durch *C*, die beide Fasskreisbögen schneidet, sind die Schnittpunkte *D* und *E* die Eckpunkte des gesuchten gleichseitigen Dreiecks. Denn wenn eine in *D* angepflockte Schnur durch *B* verläuft und eine in *E* angepflockte durch *A*, haben die Winkel in *D* und *E* die richtige Größe von 60°. Jannis muss die beiden Schnüre nur noch strammziehen und in deren Kreuzungspunkt den Pflock *F* einschlagen. Da die Gerade *DE* frei wählbar war, gibt es unendlich viele Lösungen für das Dreieck.

Beim Quadrat gibt es nur eine Lösung, mit allerdings verschiedenen Lösungswegen. Eine davon beschrieb Günter Bauer aus Radolfzell.

Jannis zieht den Kreis, der $\overline{BC}$ als Durchmesser hat. (Wie man den Mittelpunkt der Strecke $\overline{BC}$ über Mittelsenkrechten bestimmt, weiß er inzwischen.) Nach dem Satz des Thales liegt auf diesem Kreis die Quadratecke *D*, die gegenüber von *A* liegt.



Nur wo? Jannis weiß, dass die Diagonale $\overline{AD}$ des gesuchten Quadrats mit der Strecke $\overline{DC}$ den Winkel 45° einschließen muss. Anders ausgedrückt: *D* muss dritter Eckpunkt eines Dreiecks *ACD* sein, mit einem Winkel von 45° in *D*. Alle Punkte mit dieser Eigenschaft liegen auf einem Fasskreisbogen über $\overline{AC}$, diesmal mit dem Umfangswinkel 45°.

Wie findet Jannis diesen Fasskreis? Nach dem Satz vom Umfangswinkel muss der Mittelpunktswinkel das Doppelte des Umfangswinkels sein. Der Mittelpunkt *M* des gesuchten Kreises muss also so liegen, dass der Winkel *AMC* ein rechter ist.

Und der ist schnell konstruiert. Jannis zeichnet die Mittelsenkrechte und den Thaleskreis über $\overline{AC}$; deren Schnittpunkt ist *M*.

Der Schnittpunkt des Fasskreises mit dem Thaleskreis über $\overline{BC}$ ergibt *D*. Der Schnittpunkt der Geraden *CD* mit dem Thaleskreis über $\overline{AC}$ ergibt den Schnittpunkt *E* als dritten Eckpunkt.

Der letzte Eckpunkt des Quadrats ist nun reine Formsache: Jannis trägt den Abstand $\overline{DE}$ von *A* und von *D* aus ab und erhält so *F*.

Wie Rainer Knüppel aus Kirchheim zeigte, ist alle Mühe von vornherein vergebens, wenn zwei Winkel des Dreiecks *ABC* kleiner als 45° sind.

Die Gewinner der fünf Bücher „Planeten und ihre Monde“ sind Heinz Roth, Wettingen (Schweiz); Oliver Pfante, Jesenwang; Alexandra Walter, Würzburg; Roland Maier, Riemerling; und Astrid Franz, Märkisch Buchholz.

Lust auf noch mehr Rätsel? Auf der Website von Spektrum der Wissenschaft (www.spektrum.de) finden Sie jeden Monat in der Rubrik „Rätsel“ eine neue mathematische Knobelei.

Echte und falsche Paradoxa

Manche vorgeblich unlösbaren Denkrätsel verlieren bei genauerer Analyse ihren Tiefsinn.

Von Ian Stewart

„Dieser Satz ist falsch.“ Ist dieser Satz wahr oder falsch? Diese einfache Frage führt in einen unauflöslichen Widerspruch und in letzter Konsequenz zu dem Schluss, dass die naive Mengenlehre unvollständig ist. Es handelt sich nicht nur um ein Paradox in dem wörtlichen Sinne, dass eine Aussage unseren Erwartungen krass widerspricht; vielmehr zeigt uns dieses Problem die Grenzen des logischen Denkens überhaupt auf.

Nicht alle Paradoxa sind so tief liegend und hartnäckig. Unter sorgfältiger Analyse fallen manche in sich zusammen. Ich stelle Ihnen hier meine Meinung zu drei klassischen Problemen vor; sie mag Ihren Widerspruch erregen.

Protagoras, ein griechischer Philosoph im 5. vorchristlichen Jahrhundert, unterwies einen Schüler im Metier des Rechtsanwalts. Nach dem Ausbildungsvertrag war das Honorar für die Lehrtätigkeit fällig, sobald der Schüler seinen ersten Prozess gewonnen hatte. Aber nach dem Ende der Lehrzeit zeigte der Schüler keine Neigung, überhaupt Mandanten zu gewinnen, geschweige denn zu zahlen. Schließlich drohte sein Lehrer, ihn deswegen zu verklagen.

Er würde in jedem Falle gewinnen, dachte sich Protagoras. Wenn das Gericht seiner Klage stattgebe, würde es den Schüler zur Zahlung verurteilen; im anderen Falle hätte der Schüler seinen ersten Prozess gewonnen und müsste aus diesem Grunde zahlen. Der Schüler argumentierte dagegen genau umgekehrt: Wenn Protagoras gewinne, sei nach dem Wortlaut des Vertrages kein Honorar fällig; wenn Protagoras dagegen verliere, laute das Urteil ja gerade, dass nichts zu zahlen sei.

Das ist alles ganz lustig, aber bei näherer Analyse nicht besonders tiefsinnig. Beide Parteien suchen sich unter den verfügbaren Argumenten jeweils dasjenige heraus, das ihnen am besten in den Kram passt: Einmal erklären sie den Vertrag für gültig, das andere Mal gehen sie davon aus, dass das Gericht einzelne Bestimmungen oder den ganzen Vertrag außer Kraft setzen kann. Aber wieso geht man überhaupt wegen einer Streitigkeit aus einem Vertrag vor Gericht? Weil es die Aufgabe des Gerichts ist, irgendwelche unvollständigen oder widersprüchlichen Bestimmungen in dem Vertrag zu klären und durch eigene zu ersetzen, wenn es sein muss. Und da der Vertragstext, angewandt auf diesen Prozess, in sich widersprüchlich ist, hat das Gericht die Freiheit, ihn so oder anders zu interpretieren. In jedem Fall hat die Entscheidung des Gerichts Vorrang vor dem Wortlaut des Vertrages. Entscheidet es zu Gunsten von Protagoras, muss der Schüler zahlen, im anderen Falle eben nicht, Vertrag hin oder her. Unter der Sonne der Logik schmilzt das Paradox dahin.

Das Paradox der undefinierbaren Zahl

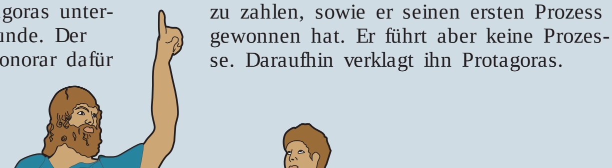
Nehmen wir ein interessanteres Beispiel; es stammt von dem französischen Logiker Jules Antoine Richard. Manche Ausdrücke der (deutschen) Sprache definieren natürliche Zahlen, andere nicht. Der Ausdruck „das Jahr des Westfälischen Friedens“ definiert die Zahl 1648, der Ausdruck „die historische Bedeutung des Westfälischen Friedens“ definiert keine Zahl. Nehmen wir den Ausdruck „die kleinste natürliche Zahl, die nicht durch einen Ausdruck aus weniger als siebzehn Wörtern beschreibbar ist“. Einerlei wie groß diese Zahl ist, wir haben sie soeben mit nur sechzehn Wörtern beschrieben. Oh.

Wie jetzt? Ist sie nun mit weniger als siebzehn Wörtern beschreibbar oder nicht? Dieser Widerspruch hat keine offensichtliche Auflösung – es sei denn, der zitierte Ausdruck definiert überhaupt keine Zahl. Also müssen wir uns überlegen, ob diese Zahl – die kleinste nicht durch einen kurzen Ausdruck beschreibbare Zahl – existiert.

Wenn wir unterstellen, dass die deutsche Sprache nur endlich viele Wörter hat, dann gibt es auch nur endlich viele Ausdrücke aus höchstens sechzehn Wörtern. Nehmen wir an, es gebe 99 999 Wörter, dann gibt es höchstens $100\,000^{16}$ Ausdrücke mit 16 oder weniger Wörtern. (Das hunderttausendste Wort ist das „leere Wort“; wir füllen die kürzeren Ausdrücke mit leeren Wörtern auf die Länge von 16 auf, um uns das Rechnen zu erleichtern.) Natürlich ist die weit überwiegende Mehrzahl der Ausdrücke sinnlos, und von den sinnvollen definieren die meisten keine natürliche Zahl; aber das heißt nur, dass wir insgesamt weniger Ausdrücke zu berücksichtigen haben. Jedenfalls: Die Menge aller Zahlen, die ▶

Das Paradox des Protagoras

PROBLEM:
Der griechische Philosoph Protagoras unterweist einen Schüler in Rechtskunde. Der Schüler verpflichtet sich, das Honorar dafür zu zahlen, sowie er seinen ersten Prozess gewonnen hat. Er führt aber keine Prozesse. Daraufhin verklagt ihn Protagoras.

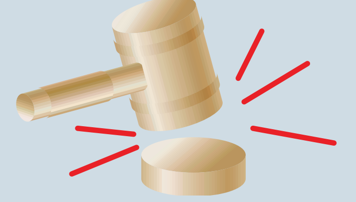


PARADOX:
Protagoras glaubt, er werde in jedem Falle gewinnen:
➤ Wenn das Gericht seinem Antrag stattgibt, muss der Schüler durch Gerichtsurteil zahlen.
➤ Wenn das Gericht dem Schüler Recht gibt, hat dieser seinen ersten Prozess gewonnen und muss aus diesem Grunde zahlen.



Der Schüler glaubt, er werde in jedem Falle gewinnen:
➤ Wenn das Gericht seinem Antrag stattgibt, wird er nicht zur Zahlung verurteilt.
➤ Wenn das Gericht seinem Lehrer Recht gibt, hat er seinen ersten Prozess nicht gewonnen und muss deshalb nicht zahlen.

AUFLÖSUNG:
Aufgabe eines Gerichts ist es, Bestimmungen eines Vertrags für nichtig zu erklären, wenn es sein muss. Deswegen ist von den Argumenten des Lehrers wie des Schülers der jeweils zweite Teil ungültig.



durch einen Ausdruck aus höchstens sechzehn Wörtern definiert werden, ist endlich, denn die Menge dieser Ausdrücke selbst ist endlich. Und nach einem elementaren Satz der Mathematik gibt es zu einer endlichen Teilmenge der natürlichen Zahlen stets die eindeutig bestimmte kleinste natürliche Zahl, die nicht in dieser Menge enthalten ist. Es hilft also nichts: Richards 16-Wörter-Ausdruck definiert eine Zahl.

Aber das kann doch nicht sein?! Man könnte Rettung in einem anderen Ausdruck suchen: „eine Zahl, die null ergibt, wenn man sie mit null multipliziert". Dieser Ausdruck definiert nämlich alle natürlichen Zahlen, also ist jede natürliche Zahl mit weniger als siebzehn Wörtern beschreibbar. Demnach beschreibt Richards Definition die leere Menge, und die hat kein kleinstes Element. Aber das hilft nicht, denn der genannte Ausdruck ist keine Definition. Er trifft auf mehr als eine Zahl zu, und Eindeutigkeit ist das Mindeste, was man von einer Definition verlangen muss.

Ist Richards Ausdruck zweideutig? Nein. Er definiert seine Zahl eindeutig: Es kann keine zwei verschiedenen kleinsten Zahlen geben, die seine Bedingung erfüllen.

Mit dem Ausdruck „die kleinste natürliche Zahl, die nicht durch einen Ausdruck aus weniger als sechzehn Wörtern beschreibbar ist" hätten wir bemerkenswerterweise keine Probleme.

Offensichtlich hält Richards Paradox der Analyse stand; es ist kein Scheinwiderspruch, sondern lehrt uns etwas über die prinzipiellen Grenzen, denen die Sprache als Beschreibung der Arithmetik unterliegt.

Das Paradox vom unerwarteten Test

Zum Schluss zur Erholung das so genannte Überraschungs-Paradox. In der klassischen Form wird jemand zum Tode verurteilt mit der Strafverschärfung, dass er den Tag seiner Hinrichtung nicht kennt, bis der Henker die Zelle betritt: Überraschung eben. Ich erzähle Ihnen hier eine jugendgeeignetere Variante. Die Lehrerin kündigt an, dass es an irgendeinem Tag der nächsten Woche (Montag bis Freitag) einen Überraschungstest geben wird. Sie ist bei der Wahl des Datums nicht eingeschränkt (durch Feiertage oder Ähnliches), und es gibt keine Möglichkeit, ihre Entscheidung vorab in Erfahrung zu bringen.

Aber die Schüler denken sich jetzt Folgendes: Wenn der Test bis zum Schulschluss am Donnerstag nicht stattgefunden hat, wissen wir, dass er am Freitag stattfinden muss, und dann ist es keine Überraschung mehr. Also können wir den Freitag als Testtag ausschließen. Jetzt haben wir dasselbe Problem mit einer verkürzten Woche: Montag bis Donnerstag. Wenn bis Mittwochnachmittag kein Test geschrieben wird, bleibt nur der Donnerstag, und die Überraschung ist dahin. Also kann der Test auch am Donnerstag nicht stattfinden. Mit derselben Überlegung schließen die Schüler Mittwoch, Dienstag und Montag aus und kommen zu dem Ergebnis, dass es gar keinen Überraschungstest geben wird.

Am Mittwoch kommt die Lehrerin mit dem Test in die Klasse, und die Überraschung ist groß. Was ist faul an der Logik?

Ich glaube, das Problem sieht aus wie ein Paradox, ist aber keins. Betrachten wir eine logisch gleichwertige Formulierung. Die Schüler verkünden jeden Morgen voll Überzeugung: „Heute wird der Test sein." Das tun sie insbesondere an dem Tag, an dem der Test tatsächlich stattfindet, und können dann mit Recht behaupten, dass der Test keine Überraschung war. Diese Aussage ist eine Art fauler Zauber – wahr, aber trivial. Einen, der täglich mit der Überraschung rechnet, kann nichts überraschen. Ich glaube – und habe das mit vielen Mathematikern diskutiert –, dass in dem Paradox mit dem Überraschungstest derselbe faule Zauber steckt, bloß viel geheimnisvoller verkleidet. Die Unklarheit entsteht dadurch, dass die Akteure der Geschichte – die Schüler – nie etwas tun, sondern sich immer nur etwas vorstellen.

Ich behaupte hier zweierlei. Erstens hängt das Paradox daran, was man unter „Überraschung" versteht. Zweitens, und wichtiger: Unabhängig von dem ersten Punkt gibt es zwei logisch gleichwertige Beschreibungen für die Vorhersagestrategie der Schüler. Eine ist die oben zitierte, die ein echtes Paradox nahelegt; die andere ersetzt hypothetische Handlungen durch echte und macht dadurch aus dem vorgeblichen Paradox eine zutreffende, aber unbedeutende Aussage.

Nehmen wir zur Verdeutlichung an, die Schüler hätten ein katastrophal schlechtes Gedächtnis. Was sie heute lernen, hält gerade noch für den nächsten Tag und ist morgen Abend schon wieder vergessen. Wenn der Test keine Überraschung wäre, dann würden die Schüler, um sich ja nicht zu überarbeiten, am Abend davor auf den Test lernen und an keinem Abend sonst. Aber wenn sie am Sonntag nicht lernen, und am Montag ist der Test, fallen sie durch. Das gleiche gilt für jeden Abend von Montag bis Donnerstag. Da freuen sich die Schüler, denn der Test ist keine Überraschung. Und die Lehrerin freut sich noch mehr, denn ihre Schüler üben bis zu fünf Abende in Folge.

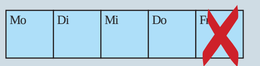
Ein sehr pädagogisches Scheinparadox! ■

***Ian Stewart** ist Professor für Mathematik an der Universität von Warwick in Coventry (England).*

Das Paradox mit dem Überraschungstest

PROBLEM:
Die Lehrerin kündigt einen Überraschungstest für einen nicht genannten Tag der nächsten Woche (Montag bis Freitag) an.

PARADOX:



Wenn der Test bis Donnerstag nicht stattfindet, wissen die Schüler, dass er am Freitag sein muss. Dann ist er keine Überraschung mehr, also kann er am Freitag nicht stattfinden.



Wenn bis Mittwoch kein Test war, wissen die Schüler, dass er am Donnerstag stattfinden muss. Ein Test am Donnerstag wäre demnach keine Überraschung, also kann er am Donnerstag nicht stattfinden.



Mit demselben Argument schließen die Schüler Mittwoch, Dienstag und Montag aus. Also ist ein Überraschungstest überhaupt nicht möglich.

AUFLÖSUNG:
Die Argumentation der Schüler ist logisch äquivalent dazu, jeden Morgen anzukündigen: „Heute wird der Test sein." Weil sie täglich mit dem Test rechnen, ist er keine Überraschung mehr, wenn er tatsächlich stattfindet.

Montag	Dienstag	Mittwoch
Schüler: „Heute wird der Test sein."	Schüler: „Heute wird der Test sein."	Schüler: „Heute wird der Test sein." Lehrerin: „Ihr habt Recht!"

Die Saubermacher

Seifen und Co. lösen Schmutz und Flecken – meistens

Kleider, Geschirr und Haare wären ganz leicht sauber zu halten, wenn sich Schmutz und Flecken in Wasser lösten – Waschen liefe dann auf schlichtes Spülen hinaus. Doch leider löst Wasser nur polare Stoffe, beispielsweise Salze, die leicht in elektrisch geladene Ionen zerfallen, oder Eiweiß- und Zuckermoleküle, die geladene Bereiche aufweisen. Der Grund: Seine Atome – Wasserstoff und Sauerstoff – sind schwach positiv beziehungsweise negativ geladen. Trifft es auf ein anderes polares Molekül, wird es elektrostatisch angezogen. So bildet sich eine Wasserhülle um den Fremdstoff – er ist gelöst und lässt sich wegschwemmen.

Für unpolare Stoffe wie Öle und Fette hat Wasser jedoch nichts übrig, es zieht die Gegenwart von seinesgleichen vor. Solche Verschmutzungen benötigen ebenfalls nichtpolare Lösungsmittel. Die bilden dann so genannte Van-der-Waals-Bindungen zum Fremdstoff aus. Das sind letztlich ebenfalls elektrische Kräfte, die auf unsymmetrischen Ladungsverteilungen beruhen, doch sind sie wesentlich schwächer als die elektrostatischen. Leider sind solche Lösungsmittel giftig und umweltschädigend – Perchlorethylen und Benzin gehören sicher nicht in die Haushaltswaschmaschine.

Eine Lösung des Lösungsmittelproblems bieten Seifen und Detergenzien. Ihr Trick: Die auch Tenside genannten Moleküle haben ein polares und ein unpolares Ende; das heißt, sie fühlen sich in beiden Welten gleichermaßen zu Hause. In Wasser bilden Tenside winzige kugel-, stäbchen- oder scheibchenförmige Gebilde, die Mizellen, wobei die polaren Enden nach außen weisen und die unpolaren nach innen. Deshalb können diese Mizellen in ihrem Innern ölartige Moleküle binden und somit lösen. ■

Seifen

Die meisten Seifen sind von Ölen und Fetten abgeleitete Salze, die aus positiv geladenen Natrium-Ionen und negativ geladenen Molekülketten bestehen. Versetzt man Wasser mit Seife, so lösen sich die Natrium-Ionen und die negativ geladenen Ketten bilden Mizellen. Die Ketten bedecken auch die Wasseroberfläche, vermindern dadurch die Oberflächenspannung und ermöglichen es dem Wasser, in Gewebe einzudringen.

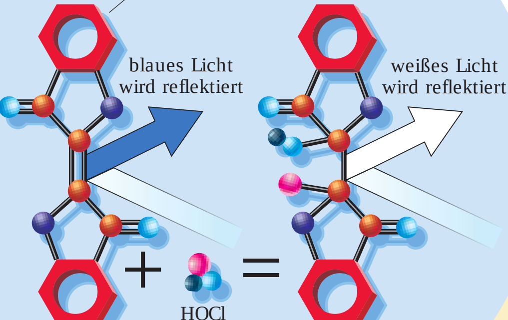
Detergenzien

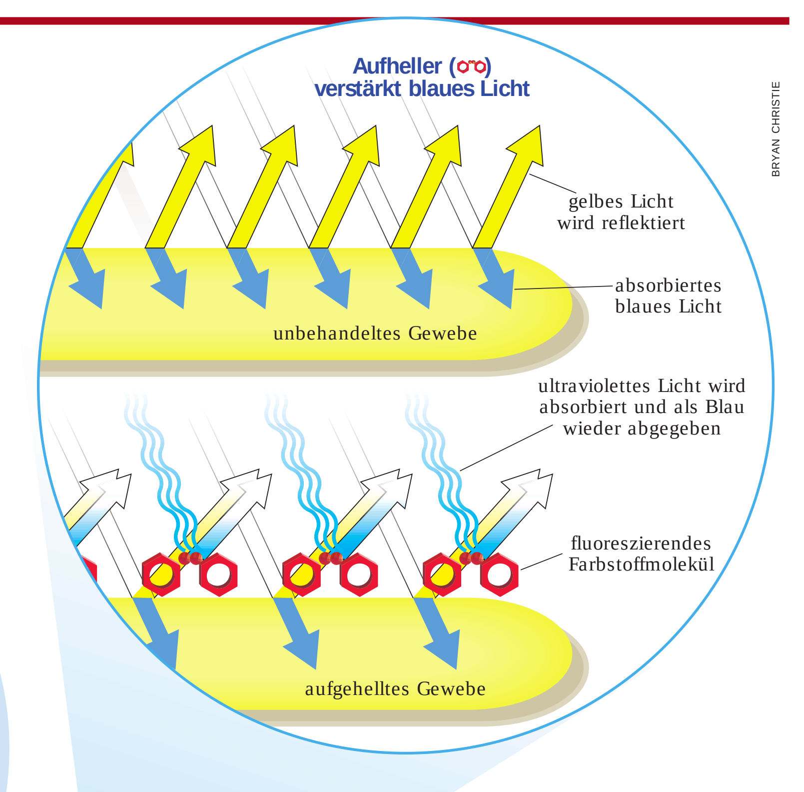
In hartem Wasser ist die Wirkung von Seife recht eingeschränkt. Positiv geladene Kalzium-, Magnesium- und Eisen-Ionen der im Wasser gelösten Salze binden sich fest an das negativ geladene Ende der Ketten und bilden schwer lösliche „Kalkseife“; so wird die Bildung von Mizellen verhindert. Detergenzien hingegen tragen zwar synthetische polare Gruppen wie Sulfonat oder Ethoxysulfat, bilden aber keine schwer löslichen Salze mit den Metall-Ionen des harten Wassers.

Bleichmittel

Manche Flecken widersetzen sich jedem Lösungsversuch. Deshalb versucht man, sie wenigstens unsichtbar zu machen. Ihre Farben verdanken sie oft schwach gebundenen Elektronen, zum Beispiel solchen in Doppelbindungen zwischen Atomen. Bleichmittel greifen dort an, und zwar mit Elementen wie Sauerstoff oder Chlor, die leicht Elektronen aufnehmen.







Aufheller

Weiße Gewebe altern mit der Zeit und vergilben, weil sie allmählich Licht am blauen Ende des Spektrums absorbieren, statt es zu reflektieren. Um dieses fehlende blaue Licht zu ersetzen, enthalten viele Detergenzien Aufheller. Diese fluoreszierenden Farbstoffe absorbieren ultraviolettes Licht und emittieren blaues. Im Sonnenlicht hat aufgehelltes Gewebe einen starken bläulichen Schimmer und erscheint glänzend weiß. An diesen Schimmer sind wir schon so gewöhnt, dass fast jedes weiße Gewebe von vornherein Aufheller enthält.

Louis A. Bloomfield *ist Professor für Physik an der Universität von Virginia.*

Wussten Sie schon ...

➤ Bereits in reinem Wasser laden sich Haare, Fasern und Schmutzteilchen negativ auf. Diese Aufladung wird durch anionische (negativ geladene) Tenside wesentlich erhöht, was die Ablösung des Schmutzes von der Faser verbessert.

➤ Nach dem eigentlichen Waschvorgang werden Weichspüler eingesetzt, die in der Regel aus kationischen (positiv geladenen) Tensiden bestehen. Sie lagern sich an die Fasern, geben ihnen Schutz und angenehmeren „Griff". Weichspüler sind außerdem parfümiert, daher der „frische" Duft von gewaschener Wäsche.

➤ Shampoo und Weichspüler in einem Gefäß zu vereinen ist schwierig, denn die negativ geladenen Shampoo-Ionen und die positiv geladenen Weichspüler-Ionen kämen sich wohl ins Gehege. Haarwaschmittel mit beiden Ingredienzien sperren die Weichspüler-Moleküle in Kristallkäfige oder Komplexe ein, die sich erst bei Wasser im Überschuss öffnen. So bleiben die Weichspüler-Moleküle beim Einseifen inaktiv und werden erst beim Spülen freigesetzt.

➤ Viele Gewebe besitzen polare chemische Gruppen, an die sich Wassermoleküle binden und so das Gewebe anschwellen lassen. Trocknen diese Fasern, so kehren sie wohl zur ursprünglichen Größe, aber nicht zur ursprünglichen Form zurück. Stattdessen kann man diese Gewebe mit unpolaren, jedoch toxischen Lösungsmitteln wie Perchlorethylen trockenreinigen. Diese enthalten dann Detergenzien, die inverse Mizellen bilden – die geladenen Bereiche liegen dort innen – und so polaren Schmutz entfernen.

Die Kulturen der Schimpansen

In Westafrika verhalten sich Schimpansen anders als in Ostafrika. Jede Population entwickelte ihre eigene soziale und Werkzeugkultur.



Serie: Der neue explosive Kosmos (Teil II)

Die Satelliten der nächsten Generation sollen sie finden: die Spuren der frühesten Phase des Urknalls. Diese so genannte Inflation, die einst das junge Universum ruckartig aufblähte, sollte das All mit Gravitationswellen deformiert haben.



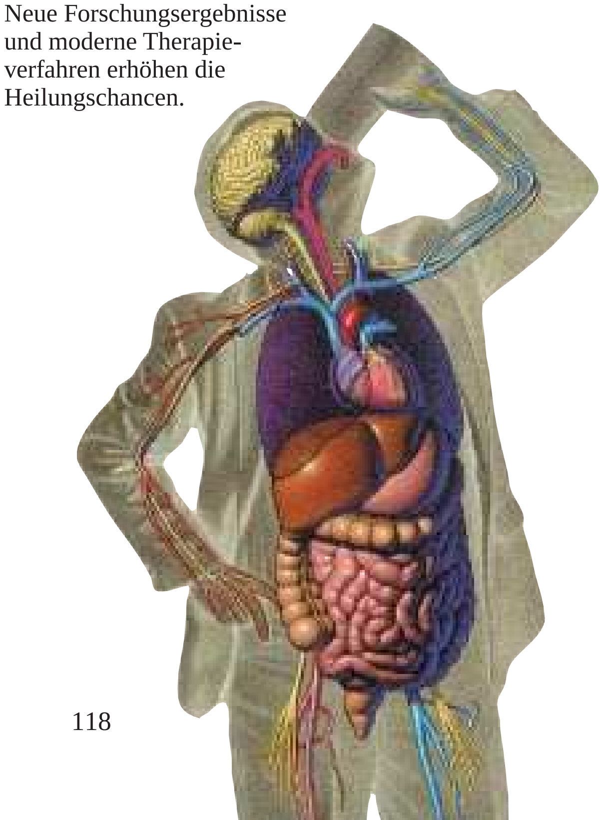
Archäometrie: Spuren des Lebens

Knochen und Zähne, Haare, Pflanzenfasern und Holzstücke bieten reichlich Informationen über die Lebensgewohnheiten unserer Vorfahren und über ihre Umwelt. Der junge Forschungszweig der Archäometrie weiß diese Quelle zu nutzen.



Suchtproblem Alkohol

Alkohol ist hierzulande die Droge Nummer eins. Fast jeder unterschätzt die gesundheitlichen Gefahren. Neue Forschungsergebnisse und moderne Therapieverfahren erhöhen die Heilungschancen.



Weitere Themen im April



Bilder, die sich selbst malen

Der Künstler Volkhard Stürzbecher steuert die Bedingungen physikalischer Prozesse so, dass sich ästhetisch ansprechende Bilder ergeben.

Ein wirklich sicherer BSE-Test?

Bisherige BSE-Tests wiegen den Verbraucher in falscher Sicherheit. Nur viel empfindlichere Nachweisverfahren könnten wirklich garantieren, dass ein Nahrungsmittel BSE-frei ist – ein Weg dazu zeichnet sich ab.